



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

**Modelo de erosión RUSLE y coeficiente de aporte de
sedimentos (SDR) para la estimación del volumen
muerto de reservorios, caso de estudio: Reservorio
Gallito Ciego**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

Roy Marco YALI SAMANIEGO

ASESOR

Renán Alberto PACHECO ABAD

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Yali, R. (2018). *Modelo de erosión RUSLE y coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) para la estimación del volumen muerto de reservorios, caso de estudio: Reservorio Gallito Ciego* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día Jueves 29 de noviembre del año 2018, siendo las 19:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. LUIS GARNICA GONZALES

Presidente

Ing. MÁXIMO AYALA GUTIÉRREZ

Miembro

Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA

Miembro

Reunidos, en Acto Académico, Público, de Sustentación de la TESIS titulada: "MODELO DE EROSIÓN RUSLE Y COEFICIENTE DE APOORTE DE SEDIMENTOS (SDR) PARA LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN MUERTO DE RESERVORIOS, CASO DE ESTUDIO: RESERVORIO GALLITO CIEGO". Presentada por el Bachiller **ROY MARCO YALI SAMANIEGO**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon al Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCIÓN

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue:

APROBADO BUENO (16)

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don ROY MARCO YALI SAMANIEGO.

Siendo las..... horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Ciudad Universitaria, 29 de noviembre del 2018

[Firma]
Ing. LUIS GARNICA GONZALES
PRESIDENTE

[Firma]
Ing. MÁXIMO AYALA GUTIÉRREZ
MIEMBRO

[Firma]
DR. FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA
MIEMBRO

[Firma]
MG. RENÁN ALBERTO PACHECO ABAD
ASESOR DE TESIS



DEDICATORIA

A Dios y a mi familia por su incondicional apoyo y comprensión durante el tiempo de aprendizaje que inició con mis estudios en la carrera de Ingeniería Geográfica.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi gratitud a todas las personas que me han apoyado en el desarrollo de esta tesis, tanto por los ánimos de desarrollarla, concluirla y por su apoyo con la experiencia que me han aportado, haciendo una mención especial a las siguientes personas:

Al Mg. Renán Pacheco, asesor de tesis, por sus comentarios y sugerencias desde el inicio de esta tesis, así como su confianza desde cuando aún cursaba sus cursos.

Al Mg. Julio Montenegro, por sus importantes comentarios y experiencia que me ha compartido, así como su apoyo científico, crítico y todas las iniciativas en las que hemos concurrido y ser un modelo de ingeniero a seguir.

Al Ing. Jairo Chunga, por haber confiado en mí cuando aún me encontraba en mi período de prácticas en la ANA y haberme inculcado en el rubro de la hidrología.

A mis amigos de la universidad, que siempre me han apoyado, pero en especial a Daniel, Jorge, Katy, Brenda, Diego y Christian con quienes he compartido gratos momentos.

A Fernando y Cesar, grandes amigos que han encaminado en la investigación.

A mis amigos del ANA, del grupo CFD-Open Source, CIDHMA, SENAMHI e INEI que siempre me han aportado en el campo de los recursos hídricos y de la programación, con quienes he aprendido a seguir adelante.

Finalmente, a mis padres y mis hermanas por su apoyo incondicional y su comprensión en todo momento.

RESUMEN

Ante una creciente población, la fuerte demanda de recursos naturales y en especial del recurso hídrico llevan a la necesidad de crear almacenes que sean de utilidad para los meses donde escasee el recurso hídrico; con este fin el Estado lleva a cabo programas de creación de presas y reservorios para poder satisfacer la demanda hídrica. El Perú, es un país con una gran riqueza en recursos hídricos; sin embargo, su distribución geográfica es limitada en la zona occidental del país, existiendo ciudades desabastecidas sin llegar a cubrir todas las necesidades.

Desde el Perú prehispánico se diseñaron infraestructuras hidráulicas que le permita una buena distribución del agua de pequeña escala. Actualmente, los avances en ingeniería han permitido la creación de presas de gran magnitud. Sin embargo, un tema poco visto en el diseño de presas es la estimación de su tiempo de vida por acumulación de sedimentos.

En esta investigación se utiliza un modelo empírico con herramientas satelitales de acceso libre, que permitan estimar el volumen muerto a través de los años y de la misma manera estimar su tiempo de vida.

El modelo de erosión RUSLE y el coeficiente de producción de sedimentos (SDR) ya han sido utilizados con resultados satisfactorios en cuencas de distintas partes del mundo, en esta investigación se ha validado a partir del volumen de sedimentos acumulado en el reservorio Gallito Ciego del río Jequetepeque, una cuenca representativa de la región más afectada por el fenómeno de erosión de suelos, así como la fuerte precipitación en eventos extraordinarios.

Los resultados indican que para el reservorio Gallito Ciego el tiempo de vida estimado es de 127 años, siendo acelerado 10 años menos por cada evento extraordinario como lo sucedido en el año 1998.

Palabras Clave: Escasez de agua, Erosión de suelo, Sedimentación, Reservorios

ABSTRACT

Before a growing population, the strong demand for natural resources and the special resource that is carried out to the need to create warehouses that are useful for months where the resource is scarce. For this, the State carries out programs of creation of dams and reservoirs to be able to supply the water demand. Peru is a country with a wealth of water resources; However, its geographic distribution is limited in the western part of the country, leaving cities without supplies to cover all the needs.

From the pre-Hispanic Peru has been designed hydraulic infrastructure that allows a good distribution of small-scale water. The advances in engineering have allowed the creation of large-scale dams. However, a little seen theme in the design of dams is the estimation of their life time by sediment accumulation.

This research uses an empirical model with free access satellite tools, which allow estimating the dead volume through the years and in the same way estimate their life time.

RUSLE erosion model and sediment delivery ratio (SDR) have already been used with satisfactory results in basins of different parts of the world, in this investigation it has been validated from the sediment volume accumulated in the reservoir Gallito Ciego of river Jequetepeque, a basin representative of the region most affected by the phenomenon of soil erosion, as well as heavy precipitation in extraordinary events.

The results indicate that for the Gallito Ciego reservoir the estimated life expectancy is 127 years, being accelerated 10 years less for each extraordinary event as happened in 1998.

Keywords: Water scarcity, Soil erosion, Sedimentation, Dams

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	11
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	13
1.3	OBJETIVOS	14
2	MARCO TEÓRICO	15
2.1	ANTECEDENTES	15
2.2	BASES TEÓRICAS	19
2.2.1	Componentes del ciclo hidrológico:	19
2.2.2	Embalses y presas	21
2.2.3	Proceso de erosión, deposición y transporte de sedimentos:	23
2.3	MODELOS DE EROSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	30
2.4	ELECCIÓN DE MODELO	32
2.5	MODELO RUSLE	33
2.5.1	Factor Erosividad (R)	34
2.5.2	Factor Erodabilidad (K)	37
2.5.3	Factor Topográfico (LS)	40
2.5.4	Factor Cobertura Vegetal (C)	42
2.5.5	Factor de Prácticas de Control de Erosión (P)	43
2.6	COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS (SDR) Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	44
2.7	VOLUMEN MUERTO EN PRESAS	49
2.8	HIPÓTESIS	50
3	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	51
3.1	ELECCIÓN DE CUENCA	51
3.2	EXTENSIÓN Y UBICACIÓN	52
3.3	ACTIVIDADES SOCIOECONOMICAS	52
3.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	54
3.4.1	Climatología:	54
3.4.2	Geología:	56
3.4.3	Hidrogeología:	58
3.4.4	Geomorfología:	60
3.5	COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO	61
3.6	RESERVORIOS	62
3.6.1	Reservorios Gallito Ciego	63

4	GENERACIÓN DE BASE DE DATOS.....	65
4.1	MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL.....	65
4.2	PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN	67
4.3	COBERTURA Y VEGETACIÓN.....	67
4.4	INFORMACIÓN DE VALIDACIÓN	72
5	METODOLOGÍA	73
5.1	DELIMITACIÓN DEL ÁREA.....	75
5.2	MODELO RUSLE.....	76
5.2.1	FACTOR R	77
5.2.2	FACTOR K	80
5.2.3	FACTOR LS	82
5.2.4	FACTOR C	84
5.2.5	FACTOR P	87
5.2.6	RUSLE	88
5.3	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	89
5.4	VOLUMEN MUERTO.....	91
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	93
6.1	ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	93
6.2	TIEMPO DE VIDA ÚTIL ESTIMADO	97
6.3	ALCANCES Y LIMITACIONES	98
6.3.1	Limitaciones del Modelo RUSLE:	98
6.3.2	Limitaciones de los Modelos de Producción de Sedimentos:	99
7	IMPACTO	100
7.1	PROPUESTAS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE LA EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN.....	100
8	CONCLUSIONES	101
9	RECOMENDACIONES	102
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
11	ANEXOS	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos. Adaptado de Merrit, 2003	32
Tabla 2: Orden de rendimiento de modelos para baja resolución (izquierda) y mediana a alta resolución (derecha).....	33
Tabla 3: Rangos típicos del factor R anual.....	35
Tabla 4: Fórmulas para el factor R a partir de precipitación media anual. Elaboración propia.	36
Tabla 5: Comparación tabular de las diferentes metodologías del Factor R, a partir de pp media anual.....	36
Tabla 6: Rangos típicos del factor K anual (Giboshi, 1999)	39
Tabla 7: Valores del factor P para las distintas prácticas de control de erosión. (Wischmeier & Smith, 1978)	44
Tabla 8: Ubicación de estaciones climáticas. Fuente: SENAMHI.....	55
Tabla 9: Cobertura Vegetal de Suelo. (INADE, 2005).....	62
Tabla 10: Presas en la cuenca Jequetepeque. Extraído del Inventario de Presas del Perú (ANA, 2015)	62
Tabla 11: Parámetros hidrológicos y geométricos de la presa. (ANA, 2015)	64
Tabla 12: Productos de Modelos de Elevación Digital de acceso libre. Elaboración propia. .	66
Tabla 13: Productos satelitales de acceso libre de precipitación. Elaboración propia.	67
Tabla 14: Estudios previos de evaluación de sedimentación. Fuente: PEJEZA	72
Tabla 15: Sedimento total retenido en el embalse Gallito Ciego. Fuente: PEJEZA	72
Tabla 16: Estaciones climáticas para la validación del factor R	77
Tabla 17: Comparación estadística de metodologías para el factor LS.....	84
Este factor ha sido hallado de parte de las siguientes cuatro metodologías. La primera metodología, propuesta por Sabino (2016), utilizado las imágenes del producto GlobalLandCover para el cálculo de este factor, otorgando un único valor a cada unidad de este factor, indistinta en el tiempo y sencillo de aplicar haciendo una reclasificación a los valores según la tabla 18.	84
Tabla 19: Valores del factor C para producto GLC30. (Sabino, 2016).....	85
Tabla 20: Comparativa de resultados a partir de diferentes metodologías para el cálculo del factor LS.	92
Tabla 21: Valores de producción de sedimentos anuales en el reservorio Gallito Ciego. Fuente: PEJEZA.	94
Tabla 22: Volumen acumulado de sedimentos en el reservorio Gallito Ciego.	95
Tabla 23: Tabla de comparación de resultados de producción de sedimentos y estimación del tiempo de vida útil en el reservorio Gallito Ciego. Elaboración propia.	97
Tabla 24: Propuestas de solución al proceso de sedimentación. Elaboración propia.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de cochas o pequeños reservorios	16
Figura 2: Partes de una cuenca en relación a la erosión y sedimentación	20
Figura 3: Vista del aliviadero del reservorio Gallito Ciego, Cajamarca – Perú (PEJEZA, 2010)	21
Figura 4: Componentes principales de una presa	22
Figura 5: Deslizamientos de rocas	23
Figura 6: Erosión eólica en el Perú (Bosque pétreo de Tinajani, Puno).....	24
Figura 7: Erosión por galerías	24
Figura 8: Erosión de ribera (Río Piura, Carretera Bayovar-Chiclayo; feb-2017)	25
Figura 9: Erosión en la costa de Huanchaco.....	25
Figura 10: Formas de erosión superficial del suelo:.....	26
Figura 11: Etapas de la erosión hídrica: A) El proceso comienza con una gota que golpea el suelo. B) La continua caída de gotas hace que este se humedezca y las partículas de suelo se desprenden. C) Al golpear el suelo, las partículas se desprenden y al mismo tiempo, son arrastradas aguas abajo. D) Las gotas caen con una fuerza explosiva haciendo salpicadas muy altas.	27
Los factores que influyen en la generación del flujo terrestre y el desprendimiento y transporte de materiales sobre la superficie terrestre se muestran en la figura 12.....	28
Figura 13: Factores que controlan el proceso de erosión (Symeonakis, 2001)	28
Figura 14: Partes del transporte de sedimentos	29
Figura 15: Comparación gráfica de las diferentes metodologías del Factor R, a partir de pp media anual	36
Figura 16: Impacto del poder erosivo ante la cobertura vegetal. Park, SD (2012)	42
Figura 17: Ejemplos de prácticas de apoyo artificial	44
Figura 18: Explicación del fenómeno de erosión y sedimentación. Adaptado de Gracia Sanchez, J. - UNAM	45
Figura 19: Método Bureau (Directo para la determinación de producción de sedimentos)....	45
Figura 20: Esquema del comportamiento del flujo superficial en subcuencas. adaptado de Harmon, 2001	47
Figura 21: Embalse Cordobilla (España) lleno de sedimentos.....	49
Figura 22: Esquema de una presa	49
Figura 23: Ubicación del área de estudio	52
Figura 24: Climatología mensual en el área de estudio. Elaboración Propia.	55
Figura 25: Boxplot de la precipitación media mensual en la cuenca Jequetepeque. Elaboración Propia.	56
Figura 26: Ubicación de unidades superficiales en la cuenca. (INGEMMET, 1994)	57
Figura 27: Mapa Geológico de la cuenca del río Jequetepeque. (INGEMMET, 2006)	58

Figura 28: Mapa Hidrogeológico de la cuenca del río Jequetepeque. (INGEMMET, 2006)..	59
Figura 29: Curva hipsométrica del área de estudio (Elaboración Propia)	61
Figura 30: Ubicación de las represas en el área de estudio. Fuente: ANA. Elaboración propia.	63
Figura 31: Vista de la presa trapezoidal Gallito Ciego. (ANA, 2015)	64
Figura 32: Esquema del embalse Gallito Ciego, 2013. (Adaptado de INADE).....	65
Figura 33: Modelo de Elevación Digital del área de estudio. (Elaboración propia)	66
Figura 34: Porcentaje de tipo de suelo según textura. Elaboración propia.....	69
Figura 35: Geoportal GlobalLandCover (GLC30)	69
Figura 36: Uso de Suelo, según GLC30. Elaboración propia	70
Figura 37: Aplicación de Earth Engine para la descarga de NDVI. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 38: Diagrama de flujo de la metodología empleada. Elaboración propia.	74
Figura 39: Delimitación del área de estudio. Elaboración propia.	75
Figura 40: Modelo digital de elevación para el área de estudio. Elaboración propia.....	76
Figura 41: Muestra del proceso de erosión en parcelas.	76
Figura 42: Recorte del producto PISCO	78
Figura 43: Distribución espacial del Factor R promedio y en año con fenómeno El Niño	78
Figura 44: Boxplot del factor R para cada año	79
Figura 45: Porcentaje de materia orgánica	81
Figura 46: Factor K para el área de estudio.....	81
Figura 47: Mapa de Pendientes del área de estudio.....	83
Figura 48: Factor LS para cada una de las 3 metodologías utilizadas.....	83
Figura 49: Factor C a partir del producto GLC30. Elaboración Propia	85
Figura 50: Comparación de las series de tiempo del factor C promedio. Elaboración propia	86
Figura 51: Comparación de la series de tiempo del NDVI con el factor C. Elaboración propia	87
Figura 52: Producto de erosión por la metodología RUSLE promedio (Izquierda) y año 1998 (Derecha). Elelaboración propia	88
Figura 53: Gráfico de barras de la erosión anual promedio en el área de estudio. Elaboración propia.	89
Figura 54: Parámetros de elevación y pendiente para cálculo de factor SDR.....	89
Figura 55: Producto SDR para cada ecuación a nivel de subcuenca.....	90
Figura 56: Acumulación de sedimentos por año. Elaboración propia.....	94
Figura 57: Comparación entre los volúmenes de sedimentos generados y observado.....	95
Figura 58: Línea de tendencia del producto calculado	96
Figura 59: Aplicación de Check Dams para la disminución de la velocidad del cauce.	101
Figura 60: Pozas de sedimentación (Izquierda), Geoweb (Derecha)	101

1. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica y la sedimentación, son los principales agentes de degradación de la tierra que engloba procesos de desprendimiento por lluvias y flujos, arrastre o transporte y deposición de partículas del suelo. Los procesos que controlan el desprendimiento de sedimentos, el transporte y la deposición son complejos, debido a esta complejidad es que se desarrollan los modelos de erosión, conteniendo diferentes subprocesos que permiten calcular la erosión y sedimentación a diferente escala.

Los proyectos hidráulicos hacen posible la vida en la costa peruana, dada la irregularidad y desigual distribución espacial de los recursos hídricos superficiales, por lo tanto, la regulación de las aguas es fundamental para su aprovechamiento; esto implica la conservación del volumen útil de los embalses durante el mayor tiempo posible, pero el gran problema es la producción de sedimentos, que afectan directamente a estas infraestructuras que sirven como reservorios y almacén del recurso hídrico, disminuyen la capacidad de almacenaje, que a su vez se traduce en la reducción de su tiempo de vida útil.

Una adecuada gestión del recurso hídrico implica la inversión en medidas de prevención que generen reserva para los meses de estiaje, por lo que es de suma importancia la identificación y ubicación de puntos factibles para la construcción de nuevos reservorios, en medida que puedan captar una óptima cantidad de agua y que la sedimentación de fondo no sea significativa.

Por lo tanto, es importante contar con un método para predecir la erosión del suelo, el transporte de sedimentos y la deposición en cuencas no maduras y bajo una amplia gama de condiciones climáticas, fisiográficas y de cobertura de la tierra. Existen métodos, en su mayoría empíricos, que relacionan la precipitación directamente a la producción de sedimentos, ya sea desde un punto de vista estadístico o en menor medida físico, limitada por la falta de caudal sólido que responde a la escasez de estaciones hidrométricas en el país. Recientemente la tecnología satelital y métodos de inteligencia artificial (machine learning) han permitido suplir hasta cierto punto la escasez de información, facilitando la aplicación de metodologías con datos espaciales mediante la aplicación de los sistemas de información geográfica y teledetección.

En la presente investigación, se utiliza la metodología de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE), y el coeficiente de aporte de sedimentos (Sediment Delivery Ratio, SDR) para la determinación de la producción de sedimentos de forma distribuida a una escala de 250 metros, con resultados óptimos en países asiáticos, europeos e incluso latinoamericanos como el caso de Bolivia; que mediante

modelamiento en lenguajes de programación y software SIG se ha podido identificar a partir de batimetría, la cantidad de sedimentos aportados en el reservorio Gallito Ciego, desde inicios de sus operaciones hasta la fecha y de la misma forma se ha extendido esta línea de tendencia, estimando el tiempo de vida útil que le resta.

Finalmente, se prueba esta metodología para el reservorio Poechos, y se plantean soluciones al problema de la erosión hídrica y producción de sedimentos en reservorios en general.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Perú ocupa el puesto 17 en relación a la cantidad de agua disponible por persona (FAO, 2002) y el puesto 14 en acceso al agua a nivel de América Latina según el Banco Mundial

Cuenta con un volumen anual promedio de 1'768,172 MMC de agua, del cual, el 2.18% pertenece a la vertiente del Pacífico y de esta, la masa aprovechable es el 47 % (ANA, 2012); sin embargo, existen valles en los que la oferta hídrica no satisface las demandas poblacionales, energéticas o agrícolas, por lo que se hace necesario crear fuentes artificiales de abastecimiento hídrico para los meses de estiaje.

Las cuencas montañosas son la principal fuente de recursos hídricos para el 65% de la población peruana, además de ubicar los proyectos hidráulicos más grandes del Perú.

Diferentes métodos de cosecha del agua han sido desarrollados por nuestros antepasados, tales como acequias, amunas¹, andenes, reservorios, terrazas, etc. Sin embargo, las capacidades de estos reservorios son mínimas comparadas con la demanda actual, por lo que desde el siglo pasado se han realizado represas con el objetivo de tener una reserva hídrica para un uso multisectorial. Estas estructuras pueden ser afectadas por diversos factores, dependiendo de la ubicación en la que han sido o serán construidas, siendo la sedimentación el mayor problema que enfrentan, ya que reduce su tiempo de vida.

En la actualidad existen diversas metodologías basadas en modelos físicos o empíricos para determinar la erosión hídrica, sin embargo, la gran mayoría de estos están enfocados en áreas

¹ **Amuna:** Es un sistema de recarga artificial de acuíferos mediante la siembra y cosecha de agua, aún implementado por algunas comunidades campesinas andinas del Perú, entre la zona de puna y quechua.

pequeñas, siendo una limitante para los tomadores de decisiones en la planificación y gestión de cuencas.

La cuenca del río Jequetepeque es una cuenca representativa de la costa peruana, sus características geomorfológicas, clima y cuenta con un valle donde se realizan diversas actividades económicas. La pérdida de suelos por la erosión pluvial ha sido un problema para las actividades agrícolas, degradando el suelo y causando una pérdida gradual de los minerales y minimizando la producción agrícola. Otro efecto negativo de la erosión hídrica es la sedimentación de reservorios causando la disminución en su tiempo de vida útil.

Por lo tanto, lo que se requiere es un método para predecir la erosión del suelo, el transporte de sedimentos y la deposición en cuencas no maduras¹ y bajo una amplia gama de condiciones climáticas, fisiográficas y de cobertura de la tierra.

De acuerdo a lo descrito se plantea la siguiente pregunta:

- ¿Cómo mediante el modelo de erosión RUSLE y el coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) se puede estimar el volumen muerto de las fuentes artificiales de abastecimiento de agua para la ubicación de nuevas obras?

Esta pregunta es complementada con los problemas secundarios:

- ¿La información espacial de acceso libre es suficiente para aplicar la ecuación RUSLE y SDR?
- ¿Las características físicas y climáticas de la cuenca afectan a la proporción entre la erosión y la producción de sedimentos?
- ¿Es factible la extrapolación de la estimación del volumen muerto en reservorios?

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Esta tesis se enmarca dentro del contexto del cambio climático, la escasez del agua y la gestión del recurso hídrico. Mostrando una alternativa a uno de los problemas que enfrenta la mayoría de presas del mundo, el acortamiento de su vida útil ocasionada por la acelerada erosión de las cuencas de captación y la producción de sedimentos.

¹ Según su tiempo geológico, las cuencas se clasifican en jóvenes, que tienen una etapa de desequilibrio erosivo, maduras, que se encuentran en una etapa de equilibrio erosivo y en estado de senectud, que representan a las cuencas erosionadas.

Se conoce que los procesos de erosión y sedimentación hídrica están influenciados por diversos factores biofísicos y humanos. Sin embargo, las escalas espaciales y temporales de los procesos son poco conocidas, lo que hace que el monitoreo y la evaluación de los procesos de erosión y deposición sean una tarea compleja, con una gran incertidumbre. (Saavedra, 2005)

Como consecuencia, es necesario mejorar la comprensión de los procesos de erosión y deposición a nivel de campo, captación y escalas regionales más amplias desde el punto de vista cuantitativo, para poder analizar su impacto *in situ* en la productividad del suelo, (e.g. Sedimentación y calidad del agua) (Wickenkamp, Duttman, & Mosimann, 2000).

El desarrollo de esta tesis permite estimar el volumen muerto almacenado por sedimentos y el tiempo de vida útil de los reservorios y planificar la ubicación de nuevas presas, aprovechando la oferta hídrica natural como parte de una política de estado y satisfacer las necesidades básicas de la población. Además, En los últimos años el Estado peruano viene impulsando programas para hacer llegar este recurso a los espacios rurales que ven limitado este recurso, principalmente para las actividades agrícolas que representan el 34% del agua que es aprovechada.

Como área de estudio, la cuenca del río Jequetepeque perteneciente a la vertiente del Pacífico viene a ser una cuenca representativa por las características geográficas que presenta, además de ubicar en su cauce el reservorio Gallito Ciego, siendo uno de los pocos reservorios que cuentan un control de sedimentos, así como de trabajos de batimetría regulares, necesarios para la validación de la tesis.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Principal

- Estimar el volumen muerto de fuentes de abastecimiento de agua por producción de sedimentos a partir del modelo de erosión RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) y el coeficiente de aporte de sedimentos (SDR).

1.3.2 Objetivos Secundarios

- Analizar espacial y temporalmente los parámetros necesarios para el cálculo y validez de los factores de la ecuación RUSLE para la cuenca alta del río Jequetepeque.

- Identificar la proporción entre la erosión y la producción de sedimentos de la cuenca alta del río Jequetepeque.
- Calcular de la producción interanual de sedimentos en el reservorio Gallito Ciego y validarla con información batimétrica para estimar el volumen muerto del reservorio.
- Evaluar la utilidad de los resultados y realizar propuestas sobre su aplicación en represas con cuencas de características similares.

2 MARCO TEÓRICO

El presente capítulo hace referencia al estado de arte una revisión bibliográfica donde se extraen las principales fuentes de información relacionada a la tesis, dando énfasis a los procesos de erosión y sedimentación. En el marco conceptual se definen los conceptos más utilizados en el desarrollo de la investigación, los conceptos técnicos como la erosión y sedimentación, la explicación de la relación entre estos conceptos y también metodologías existentes en el desarrollo de la tesis.

2.1 ANTECEDENTES

La erosión hídrica del suelo es una forma de degradación de la tierra estimándose que, en el año 2003, una sexta parte de los suelos del mundo fueron afectados por la erosión hídrica (Alatorre, 2003).

La erosión y la sedimentación engloban los procesos de desprendimiento por lluvias y flujos, arrastre o transporte y deposición de partículas del suelo. Los procesos que controlan el desprendimiento de sedimentos, el transporte y la deposición son complejos. Debido a esta complejidad es que se desarrollan los modelos de erosión, englobando diferentes subprocesos que permitan calcular la erosión y sedimentación a diferente escala.

Enmarcando la tesis dentro del problema de la escasez del agua, desde las civilizaciones egipcias y griegas, se construyeron obras hidráulicas como compuertas, presas y máquinas hidráulicas para su abastecimiento; ya en el Perú, las civilizaciones preincas e Incas desarrollaban complejos sistemas hidráulicos como por ejemplo represas altoandinas, sistemas

de almacenamiento, amunas, puquiales, canales de riego, cochas, camellones, andenes¹, entre otros.



Figura 1: Sistema de cochas o pequeños reservorios

En la actualidad, ante una creciente densidad poblacional y un mal manejo en la gestión del recurso hídrico, se han destinado tierras a cultivos que no necesariamente sean óptimamente aprovechables, tales como el caso del arroz en el valle del Tambo o las plantaciones de caña de azúcar en el valle Chancay-Lambayeque, mencionados en los estudios de “Diagnóstico de Problemas y Conflictos en la Gestión de Cuencas” realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Este problema trae una ineficaz distribución del recurso hídrico y la necesidad de agua en los meses de estiaje se hace mayor, siendo una solución la ubicación de sistemas de almacenamientos como las presas u otras fuentes artificiales de almacenamiento, que en la actualidad están siendo impulsadas por el programa Sierra Azul, parte del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI).

Se han construido presas para captar este recurso en diferentes regiones del país, siendo las más emblemáticas por su envergadura las represas de Poechos en la cuenca del río Chira con una capacidad inicial de 1000 millones de metros cúbicos de agua (MMC) y que en la actualidad puede almacenar sólo 440 MMC, debido a la acumulación de sedimentos en el fondo del reservorio; la represa de Gallito Ciego construido con una capacidad de 574 MMC y cuya capacidad útil al año 2012 se redujo a 400 MMC; también se pueden mencionar los casos de

¹ Inventariados 340 719 has de andenes en 11 regiones del Perú, siendo más del 75% usados hasta la actualidad. Fuente: Programa Andenes (AgroRural, 2014)

los reservorios de Tinajones, Condoroma, entre otros. En todas se tiene el problema de la disminución de la capacidad útil por la producción de sedimentos y afectando directamente a su tiempo de vida útil.

Un problema general en gran parte de los reservorios del mundo es su acortamiento de vida útil por la tendencia a colmatarse rápidamente por la acumulación acelerada de sedimentos a tasas muy superiores a las previstas en los diseños (Jiménez & Farías, 2005); a esto se suma que el Perú, gran cantidad de presas se encuentran ubicadas en áreas con un relieve irregular, abrupto y escarpado, fuertes pendientes, suelos inestables, poca cobertura vegetal y un régimen de lluvias intensas y recurrentes, además acentuado por fenómenos de El Niño (Rocha, 2006).

Partiendo de esa premisa; hasta la fecha, en el Perú no se han realizado estudios a nivel de cuenca para determinar el tiempo de vida de los reservorios mediante técnicas cartográficas, sin embargo, se vienen utilizando algunos métodos empíricos directos, como los que se mencionan en el capítulo 2.6, para calcular el aporte sólido en los reservorios y así, estimar el tiempo de vida de estas obras.

Entre la bibliografía revisada, se destaca la labor de los siguientes investigadores e instituciones que han desarrollado estudios dentro de las ramas de la hidrología, sedimentología y ciencias geográficas que han aportado estudios para estimar el tiempo de vida de reservorios o algo más común, estimar el aporte de sedimentos de una cuenca a un punto en la red hídrica:

O. Ortiz y E. Ingol (2015), en su artículo: “Sediment Transport in the Jequetepeque River and its Impact on the Gallito Ciego dam, Perú” contempla lo siguiente:

- Utiliza la distribución de Gumbel y modelos empíricos unidimensionales para predecir los caudales y determinar la tasa de sedimentación anual en el embalse.
- Concluye que hay una discrepancia de los resultados de su investigación con la tasa de diseño, evidenciando el poco manejo que se le dio al estudio sedimentológico.

S. Morera (2014), en su tesis de doctorado: “Magnitud, frecuencia y factores que controlan los flujos sedimentarios desde los andes centrales occidentales hacia el Océano Pacífico peruano” muestra y concluye lo siguiente:

- Cuantifica y caracteriza la señal de la magnitud y frecuencia del transporte de sedimentos desde los Andes centrales occidentales hacia el océano Pacífico, para esto tomó muestras de materiales en suspensión (MES) de 20 cuencas entre las latitudes 2°S y 18°S. Realizó un

análisis estadístico de las series diarias y subdiarias, revelando una fuerte gradiente latitudinal y longitudinal con escurrimientos que fluctúan entre 2.4 y 25.5 l.km².año⁻¹, así como un amplio rango de caudal sólido específico que va desde 9 a 2000 t.km².año⁻¹.

- Concluye que existe entre una moderada a fuerte correlación positiva entre los caudales anuales y la producción de sedimentos en la zona norte y centro del país. Las variaciones estacionales de los caudales surgen de variaciones en las precipitaciones y los cuales están controlados por fluctuaciones en los patrones atmosféricos.

- Otra conclusión es que la producción de sedimentos es influenciada por la presencia de montañas (pendiente y elevación), geología, cobertura vegetal, clima y actividad antrópica. Sin embargo, durante eventos El Niño, debido al incremento de las precipitaciones pluviales, el movimiento de grandes volúmenes de sedimentos es frecuente y se presenta mediante un proceso de erosión rápida, incrementándose entre 10 a 30 veces el promedio anual.

Como principal referente para esta investigación, se tiene el estudio realizado por C. Saavedra (2005) en su tesis doctoral: “Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques” teniendo como caso de estudio cuatro presas del departamento de Cochabamba en Bolivia. Aquí evidenció lo siguiente:

- El proceso de erosión y de transporte de sedimentos teóricamente involucra el disgregamiento y movilización de las partículas del suelo desde las arcillas a arenas. Por lo cual representa un proceso físico que se desarrolla en una escala espacial y temporal muy pequeña (p.e. evento de tormenta). Se basa en la utilización de modelos físicos de erosión que se comportan bien a escalas grandes como parcelas y terrenos en pendiente; sin embargo, lo que se requiere para la planificación y gestión de cuencas es desarrollar estos modelos a escala de cuencas, provincias o regiones.

- Asimismo hace una comparación entre modelos conceptuales y distribuidos obteniendo las potencialidades de cada modelo según los diferentes ambientes climáticos y topográficos.

- Concluye realizando una validación de los resultados de los modelos calculando el peso de los sedimentos en los cuatro reservorios de estudio, evidenciando buenos resultados.

Finalmente, en cuanto a la distribución espacial de la producción neta de sedimentos y estimación de tiempo de vida de reservorios, se han realizado estudios en diferentes países combinando el modelo RUSLE y el Ratio de Aporte de Sedimentos (SDR) integrados mediante

Sistemas de Información Geográfica (GIS). Presentando resultados que dependen principalmente de la topografía y erosionabilidad del suelo; y como factores de menor importancia la cobertura de uso de suelo y la erosividad de la lluvia, donde las temporadas de avenidas se asocian con la producción de sedimentos acumulados en la desembocadura de los ríos, o en su defecto almacenadas en embalses, reduciendo su tiempo de vida.

Las conclusiones por parte de Saavedra con respecto a las potencialidades de los modelos de erosión más adecuados para cada resolución espacial han sido de utilidad en la selección del modelo con el que se ha desarrollado la investigación, teniendo como limitantes de información espacial tales como estaciones hidrometeorológicas y batimetría periódica de los reservorios.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Componentes del ciclo hidrológico:

El ciclo hidrológico es la descripción del movimiento que realiza el agua a través de la hidrósfera, atmósfera y biósfera terrestre, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.). (Chow, 1988)

El ciclo del agua ocurre en forma continua y presenta los siguientes pasos:

Precipitación pluvial: Viene a ser el agua que emana de las nubes y cae al suelo, convirtiéndose fuente principal de agua para las corrientes superficiales y subterráneas.

Evapotranspiración: Considerada como el paso del agua desde el suelo y/o a través de las plantas, a la atmósfera en forma de vapor.

Infiltración: Es el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio Mijares & Mijares, 1989).

Escorrentía superficial: Es una lámina de agua que circula libremente por las superficies y ocurre cuando el suelo recibe más lluvia o riego de la que puede sostener y no se infiltra por el terreno; el agua al correr, puede llegar a arrastrar partículas sólidas.

Es necesario identificar las partes de una cuenca según el comportamiento de la erosión y sedimentación en estos:

- Cuenca Alta: Corresponde a la zona donde nace el río, el cual se desplaza por una gran pendiente, una de sus principales características es que en esta zona predomina el fenómeno de la socavación, es decir que hay aportación de material terreo hacia las partes bajas de la cuenca, visiblemente se ven trazas de erosión.
- Cuenca media: Es la parte de la cuenca en la cual hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale. Visiblemente no hay erosión.
- Cuenca baja: Corresponde a la parte de la cuenca en la que el agua del río se ralentiza y la energía para el transporte de sedimentos se reduce considerablemente. La mayor parte del sedimento se acumula en la desembocadura del río formando un delta que se mueve lejos de la costa por las corrientes oceánicas.

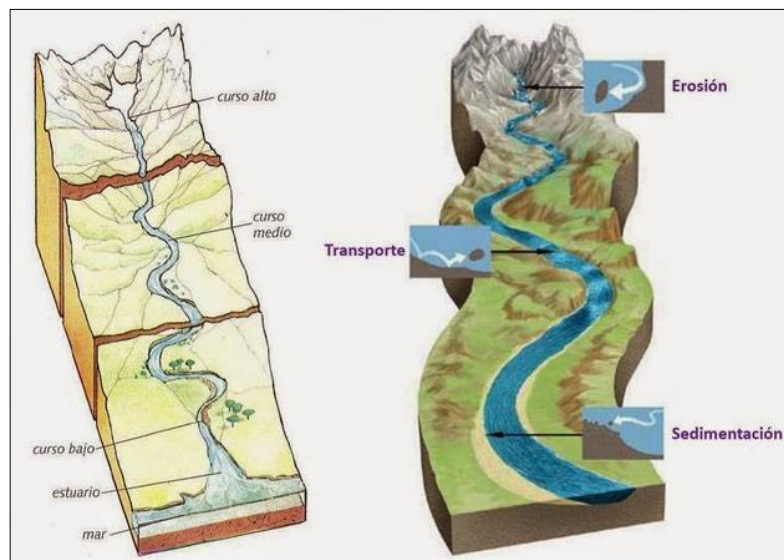


Figura 2: Partes de una cuenca en relación a la erosión y sedimentación

Los ríos como agente erosivo:

Los ríos transportan, por diversos procedimientos, una gran cantidad de materiales que previamente han arrancado del terreno. La capacidad del río para arrancar estos materiales constituye su fuerza erosiva. Una vez arrancados, los materiales son transportados por las aguas, lo que origina a su vez la erosión del cauce y las orillas del río, y finalmente son depositados en forma de sedimentos o aluviones. Todo este proceso tiene lugar según unos ritmos preestablecidos y da origen a una serie de paisajes muy variados.

2.2.2 Embalses y presas

- **Embalses**

Los lagos y reservorios naturales contienen aproximadamente dos tercios del agua superficial y atmosférica de la Tierra. La administración del agua de estos cuerpos, puede ayudar a las comunidades a mitigar la variabilidad estacional y anual de las precipitaciones y la escorrentía.

Los embalses son volúmenes de agua retenidos en un vaso topográfico natural o artificial gracias a la realización de obras hidráulicas. Estos pueden ser diseñados con un único propósito o multipropósito ya sea para regular el caudal de un río o arroyo, almacenando el agua de los períodos húmedos para utilizarlos durante los períodos más secos para el riego, abastecimientos de agua potable, generación de energía hidroeléctrica, entre otros.



Figura 3: Vista del aliviadero del reservorio Gallito Ciego, Cajamarca – Perú (PEJEZA, 2010)

Existen diferentes factores físicos que inciden en la operación de los embalses, tales como las características morfológicas de la cuenca, parámetros geológicos y climáticos que predominan en la región.

El hidrograma típico de crecida de un pequeño río tiene generalmente la forma de una curva que asciende rápidamente hasta un caudal máximo y luego desciende más lentamente. Si la avenida pasa a través de un embalse, el hidrograma de aguas abajo es modificado, convirtiéndose la punta de la crecida en una curva ligeramente achatada.

Esto se debe al almacenamiento temporal dentro del embalse, cuyo efecto es siempre el de regular, prolongando la duración del flujo de la avenida, evidenciando la cualidad que tienen los embalses de moderar los picos de crecida. Es en estos picos, que superando un umbral de arrastre de sedimentos, donde se produce la mayor cantidad de producción de sedimentos.

- **Presas**

Las presas son estructuras que tienen como objetivo embalsar el agua en el cauce fluvial para elevar su nivel con el objetivo de derivarla y darle un mejor aprovechamiento y distribución. Se pueden clasificar de distintas formas, siendo el material del que están hechos el más importante. Las presas de tierra fueron utilizadas mayormente en la antigüedad, teniendo menos exigencias a la deformabilidad que otros tipos de presa.

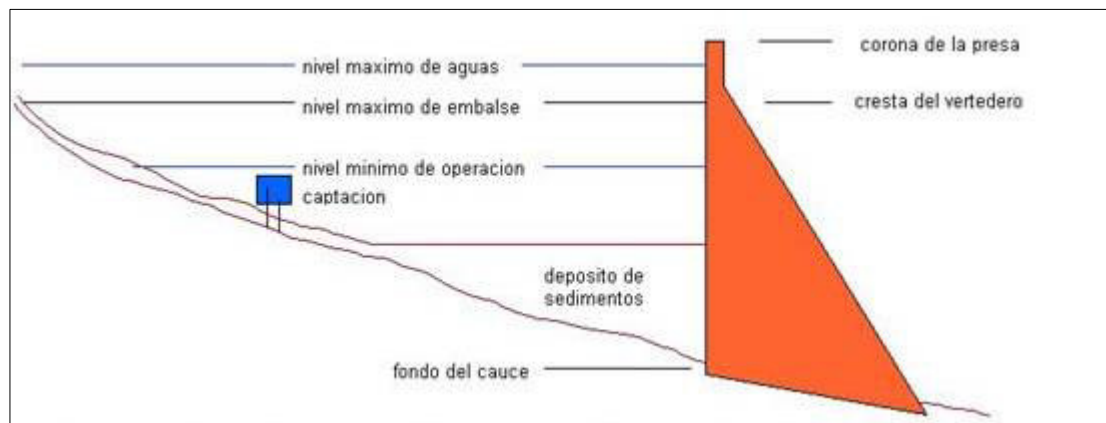


Figura 4: Componentes principales de una presa

- El embalse útil está comprendido entre el Nivel Máximo de Embalse¹ y el Nivel Mínimo de Operación.
- El Nivel Máximo de Operación es el nivel máximo con el que trabaja la presa, que es limitado la solera del aliviadero, buscando regular la descarga del caudal de aguas abajo y la sostenibilidad del embalse.
- La Altura de la presa se mide desde la Corona de la Presa y el Fondo del Cauce.
- La distancia que hay entre la Corona de la Presa y el Nivel Máximo de Aguas es el Borde Libre.
- Durante la vida útil de la obra, el agua en el embalse no debe superar el Nivel Máximo de Aguas, ni si quiera durante las crecidas extraordinarias.

¹ El Nivel Máximo de Embalse se entiende como el Nivel Máximo Maximorum, que es el nivel máximo donde la prioridad es la seguridad de la presa, donde el caudal descargado es el mismo que el que ingresa al embalse.

2.2.3 Proceso de erosión, deposición y transporte de sedimentos:

La erosión como tal es un proceso natural en el cual las partículas del suelo se mueven de su lugar original a otros lugares debido a la acción de las aguas de escorrentía, el viento u otra razón natural. La erosión desgasta la capa fértil de los suelos haciéndolos improductivos para el cultivo. Aunque es un proceso natural, el mayor impacto ocurre en suelos que no tienen vegetación o como en el caso de la urbanización, suelo del cual se ha removido la capa que tiene influencia vegetal.

La FAO define a la erosión del suelo se refiere a las pérdidas absolutas de suelo de la capa superficial y de los nutrientes del suelo.

La UNESCO la define como un fenómeno que resulta del desgaste de elementos del suelo por la acción del viento (erosión eólica) o del agua (erosión hidráulica), que remueve su superficie y produce la degradación de rocas y piedras.

- **Tipos de erosión:**

- **Erosión natural y progresiva:**

- Es la erosión geológica, proceso que puede prolongarse por millones de años, donde intervienen todos los agentes físicos como la lluvia, nieve, frío, calor y viento.

- **Erosión de deslizamiento o remoción en masa:**

- Se produce por deslizamiento de material (suelo, arena, gravas y bosques), sea lento (pocos centímetros al año) o rápido, debido a la pérdida de estabilidad de una ladera por lluvia, movimientos sísmicos u otros factores.



Figura 5: Deslizamientos de rocas
(Foto de la Carretera Central, altura de Matucana feb-2017)

- **Erosión hídrica:**

Producida por el agua de lluvia a través del golpeteo de las gotas sobre la superficie, los cambios en regímenes de humedad o el arrastre de las partículas del suelo, siendo el factor más importante y la aplicada a esta investigación, la energía generada por la intensidad de la lluvia.

- **Erosión eólica:**

Se produce por el transporte de partículas por el viento que chocan contra las rocas y la dividen en más partículas que van chocando con otros elementos. Algunos resultados de esta erosión se pueden ver como dunas en los desiertos, o montañas rectangulares. Naturalmente requieren de un tiempo largo.



Figura 6: Erosión eólica en el Perú (Bosque pétreo de Tinajani, Puno)

- **Erosión por galería o túnel:**

Se forma en suelos que tienen materiales subsuperficiales fácilmente dispersables, donde la circulación de un exceso de agua atraviesa grietas y terraplenes poco compactados. La entrada de agua en el suelo hace que el material quede en suspensión y el lodo formado pueda circular, aumentando progresivamente el tamaño del túnel, en ocasiones produciendo colapsos en el terreno.



Figura 7: Erosión por galerías

- **Erosión de ribera:**

Es la erosión lateral que se produce en las riberas de los ríos por efecto del flujo.



Figura 8: Erosión de ribera (Río Piura, Carretera Bayovar-Chiclayo; feb-2017)

- **Erosión costera:**

Se produce por la acción erosiva de las olas, efectos de las mareas y corrientes marinas a lo largo del mar o de la costa alterando la roca, pudiendo formar playas de arena o guijarros, como acantilados.



Figura 9: Erosión en la costa de Huanchaco

- **Erosión superficial del suelo:**

Agrupar diferentes formas de erosión que se dan en la superficie de los terrenos, que se manifiesta por el acumulado de la erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión en surcos y en cárcavas.



Figura 10: Formas de erosión superficial del suelo:
A) Erosión por salpicadura, B) Erosión laminar, C) Erosión en surcos, D) Erosión en cárcavas

A) Erosión por salpicadura:

Las gotas de lluvia, por acción de su impacto sobre la superficie del suelo desnudo, actúa compactando y destruyendo su estructura, haciendo saltar partículas a una cierta altura y posteriormente arrastradas por el flujo de agua. Este efecto es reducido por la presencia de una cubierta vegetal que protege el suelo en dos fases, una de intercepción de las gotas de lluvia y otra, como parte del enraizamiento.

B) Erosión laminar:

Es producida de una forma uniforme sobre la capa superficial del suelo, removiéndose unas delgadas capas. Generalmente se produce en las zonas desprovistas de vegetación, suelos con poca cohesión y poca materia orgánica. Este lento proceso cada año va degradando unas láminas superficiales del terreno, finalmente acaban perdiendo el horizonte A y por lo tanto el suelo pierde fertilidad.

C) Erosión en surcos:

Ocurre cuando el agua de la escorrentía se concentra y abre pequeñas incisiones (centímetros o milímetros) en el suelo, llegando a sobrepasar la capa arable en terrenos cultivados.

D) Erosión en cárcavas:

Se forma cuando el flujo de la escorrentía abre surcos de mayor tamaño (métrico) progresando en profundidad y anchura. Como resultado, trae como consecuencia:

- Pérdida de suelo
- Pérdida en la capacidad de reserva de agua

La erosión hídrica es inducida por eventos naturales como la lluvia o deshielo, o artificialmente por el riego (Foster, 1982). El desprendimiento de las partículas individuales del suelo se puede producir cuando las gotas de lluvia golpean la superficie y superan las fuerzas intersticiales que sujetan las partículas del suelo. Esto se conoce comúnmente como "salpicadura" (Thornes, 1990). A medida que los eventos que lo inducen continúan, el agua se infiltra en el suelo a una velocidad controlada por la intensidad del agua que golpea la superficie y la capacidad de infiltración del perfil vertical del suelo.

De ambas definiciones se concluye que es un fenómeno perjudicial tanto para actividades agrícolas, como la mayor parte de obras hidráulicas.

La erosión tiene como consecuencia la sedimentación. Las partículas de tierra o suelo eventualmente son arrastradas y acumuladas en el fondo de los cuerpos de agua disminuyendo el espacio disponible para su almacenaje en quebradas, río y lagos y alteran la calidad del agua. Los mismo puede ocurrir en el sistema de alcantarillado, defensas ribereñas o presas, provocando con la sedimentación que estos se colmaten u obstruyan.

El proceso de la erosión, considera tres actos (erosión o intemperismo, transporte y acumulación). En la figura 11, se muestran las etapas de la erosión hídrica:

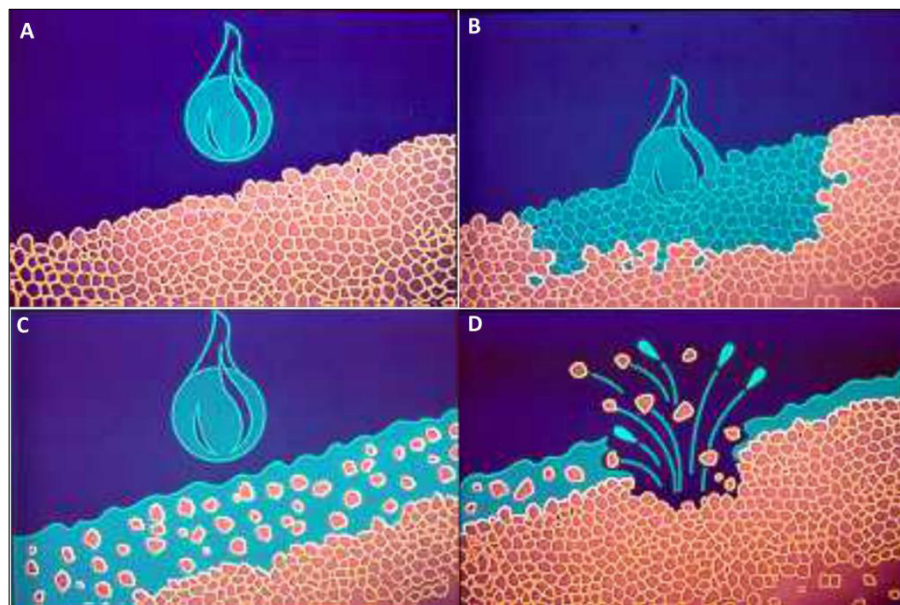


Figura 11: Etapas de la erosión hídrica:

A) El proceso comienza con una gota que golpea el suelo. B) La continua caída de gotas hace que este se humedezca y las partículas de suelo se desprenden. C) Al golpear el suelo, las partículas se desprenden y al mismo tiempo, son arrastradas aguas abajo. D) Las gotas caen con una fuerza explosiva haciendo salpicadas muy altas.

De acuerdo a las fuerzas que actúan y tiempos de ocurrencia, la erosión puede ser: Natural o geológica, y sus tasas de ocurrencia son generalmente bajas; que pueden ser aceleradas debido al mal manejo del suelo.

Los factores que influyen en la generación del flujo terrestre y el desprendimiento y transporte de materiales sobre la superficie terrestre se muestran en la figura 12.

Como se mencionó en la definición de cuencas, en las partes altas la escorrentía avanza por la superficie y a medida que converge se hace cada vez más concentrado hasta el punto que llegue a ser lo suficientemente erosivo y formar “rieles”, estos rieles a medida que aumente el poder erosivo pueden formar barrancos o cárcavas.

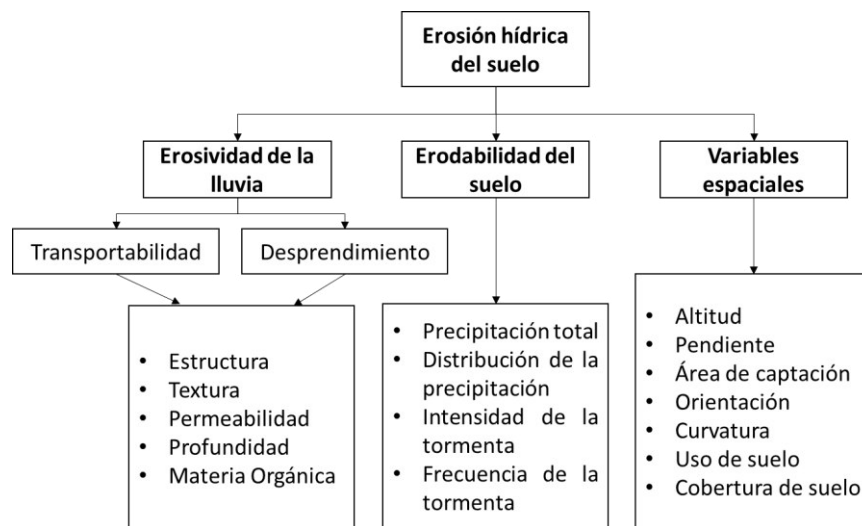


Figura 13: Factores que controlan el proceso de erosión (Symeonakis, 2001)

La erosión hídrica comienza en las áreas entre arroyos y quebradas, y mientras el agua continúe fluyendo aguas abajo llegará a algún cauce, a través del cual tanto el agua como los sedimentos siendo transportados hacia la salida de la cuenca (Nichols & Renard, 1999). En caso que el flujo de agua disminuye en velocidad (p.e. cambio de pendiente), algunas partículas del suelo comienzan a ser depositadas porque los flujos reducidos no pueden transportar tanto material.

El transporte de sedimentos por una corriente de agua está compuesto de dos partes: el transporte de fondo, principalmente partículas gruesas (arena, grava, guijarros y cantos rodados) transportados en la parte inferior; mediante saltos, deslizándose o rodando. Y el transporte en suspensión que se efectúa en la columna de agua producto de un equilibrio entre los puntos de agitación o turbulencia. Su heterogeneidad puede crear una distribución

diferente del material en suspensión, tanto en profundidad como lateralmente en la corriente de agua (Hicks & Gomez, 2003).

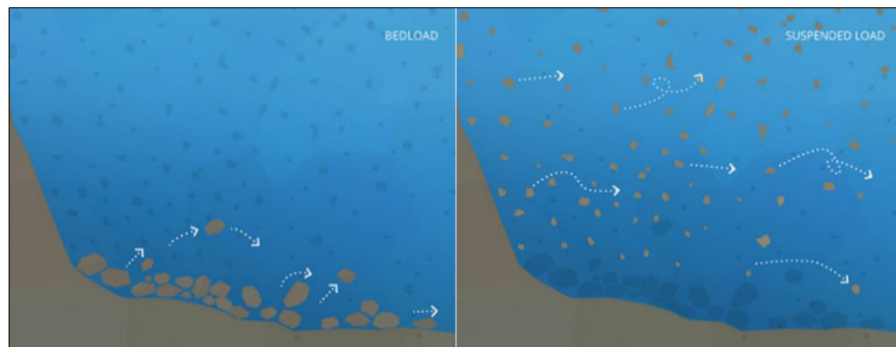


Figura 14: Partes del transporte de sedimentos

La capacidad de transporte es la cantidad máxima de sedimento que un flujo puede transportar sin depositarla. La capacidad de separación y la capacidad de transporte están interrelacionadas, y es su interacción la que controla los patrones y magnitudes tanto de la erosión como de la deposición (Slaymaker, 2003).

El proceso de la erosión está vinculado a la capacidad de separación como factor limitante. Por ejemplo, si la capacidad de desprendimiento del suelo es significativamente menor que la capacidad de transporte, entonces la cantidad y magnitud de la erosión del suelo está limitada por la capacidad de desprendimiento. Además, si la capacidad de desprendimiento es significativamente mayor que la capacidad de transporte, entonces la cantidad y magnitud de la erosión del suelo está limitada por la capacidad de transporte de sedimentos (Harmon, 2001).

La cantidad de sedimento que se produce está en una función de los procesos de erosión y deposición. La producción de sedimentos, es la cantidad de suelo erosionado que se entrega a un punto en la cuenca que suele estar alejado del origen de las partículas de suelo separadas.

En una cuenca, la producción de sedimentos es la erosión de la superficie sin incluir el sedimento que se deposita después de ser erosionado y antes de llegar al punto de interés (Alonso, 1995).

La producción de sedimentos puede estimarse para un punto determinado de una cuenca mediante la aplicación de un coeficiente de aporte de sedimentos, que es la fracción o porcentaje de erosión bruta que llega a un punto dado y será detallado en el capítulo 2.6.

La mayoría de los tipos de erosión son influenciados por el paisaje, así como las características de la lluvia. El desarrollo de la erosión en cárcavas y quebradas requiere que la concentración del flujo y las descargas superen unos umbrales críticos, que depende de la longitud de la pendiente.

La producción de sedimentos total de una cuenca es dada por la suma de todos los tipos de erosión existentes en esa área. La carga de sedimentos se transportará a lo largo de la red hídrica hasta la desembocadura de acuerdo a un enrutamiento específico. La cantidad de sedimentos recogidos depende de la erosión local, la entrega de sedimentos desde aguas arriba y la entrega de sedimentos por el flujo superficial (Rustomji & Prosser, 2001).

2.3 MODELOS DE EROSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El principal problema al estimar la producción de sedimentos se debe a la dificultad para observar y medir los procesos de erosión durante los eventos de escorrentía o erosión, debido a las pequeñas escalas y temporales en que ocurren los procesos. Las metodologías para predecir la erosión del suelo, el transporte de sedimentos y la deposición en cuencas depende de una cantidad de factores climáticos, fisiográficos y de cobertura de la tierra.

Existen varios modelos de erosión que se han desarrollado hasta la fecha, basados en ecuaciones matemáticas que permitan identificar la erosión y el transporte de sedimentos. La gran mayoría de estos modelos son basados en procesos que pueden dividirse en tres grupos: parcela, campo o pendiente; escala de captación y modelos de paisajes complejos (Merrit, Letcher, & Jakeman, 2003).

Muchos modelos que involucran los conceptos anteriores, requiriendo una gran cantidad de datos de entrada no disponibles en la mayoría de cuencas y además los métodos numéricos utilizados para la implementación del modelo muestran inestabilidades cuando se usan en altas resoluciones (Perrin, 2001). Por lo mencionado, las aplicaciones de los modelos físicos son laboriosas y no prácticas, especialmente para cuencas de grandes áreas.

Modelos Empíricos

Los modelos empíricos son generalmente los más simples, basándose en el análisis de experimentos de campo y buscando una respuesta similar usando inferencia estadística.

Modelos Conceptuales

Los modelos conceptuales intentan reflejar los procesos físicos que gobiernan el sistema, pero los describen con relaciones empíricas. Aunque tienden a ser agregados, sus procesos son gobernados por el comportamiento.

Modelos basados en física

Estos modelos se basan en una comprensión de la física de los procesos de erosión y transporte de sedimentos y describen el sistema de sedimentos usando ecuaciones que gobiernan la transferencia de masa, momento y energía (Doe, 1999)

Modelo	Tipo	Escala espacial	Escala temporal	Requerimientos	Salidas
AGNPS	Conceptual	Cuencas Pequeñas	Eventos/ Continuo	Alto	Escurrimiento, velocidades pico, erosión, producción de sedimentos
ANSWERS	Físico	Cuencas Pequeñas	Eventos/ Continuo	Alto	Escurrimiento, tasas pico, erosión, sedimentos, producción de sedimentos
CREAMS	Físico	Cuencas Pequeñas	Eventos/ Continuo	Alto	Erosión, deposición
EMSS	Conceptual	Parcelas	Continuo	Bajo	Escurrimiento, carga de sedimentos
FLO-2D	Conceptual	Cuencas Pequeñas	Continuo	Alto	Escurrimiento, velocidades pico, erosión, producción de sedimentos
HSPF	Conceptual	Cuencas	Continuo	Alto	Escurrimiento, caudal, carga de sedimento
IHACRES-WQ	Empírico/ Conceptual	Cuencas	Continuo	Bajo	Escurrimiento, sedimento
IQQM	Conceptual	Cuencas	Continuo	Moderado	Sedimento, carga de sedimento
LASCAM	Conceptual	Cuencas	Continuo	Alto	Escurrimiento, sedimentos
SWAT	Conceptual	Cuencas	Continuo	Alto	Escurrimiento, velocidades pico, erosión, producción de sedimentos
AGWA	Conceptual/ Físico	Cuencas	Continuo	Alto	Escurrimiento, velocidades pico, erosión, producción de sedimentos
GUEST	Físico	Parcelas	Continuo	Alto	Escurrimiento, concentración de sedimentos
KINEROS2	Físico	Cuencas Pequeñas	Eventos	Alto	Escurrimiento, velocidades pico, erosión, sedimento
LISEM	Físico	Cuencas Pequeñas	Eventos	Alto	Escurrimiento, sedimento
EUROSEM	Físico	Cuencas Pequeñas	Eventos	Alto	Escurrimiento, erosión, sedimento
PERFECT	Físico	Parcelas	Continuo	Alto	Escurrimiento, erosión
SEDNET	Conceptual/ Empírico	Cuencas	Anual/ Continuo	Alto	Sedimento suspendido, contribución relativa al flujo, procesos de erosión de barrancos
TOPOG	Físico	Cuencas		Alto	Peligro de erosión
USLE	Empírico	Parcelas	Anual	Alto	Erosión
RUSLE	Empírico	Cuencas	Anual	Alto	Erosión
RUSLE-3D	Empírico/ Conceptual	Cuencas	Anual	Moderado	Erosión
USPED	Empírico	Cuencas	Eventos/ Anual	Moderado	Erosión/deposición
EROSION-3D	Físico	Cuencas	Eventos	Alto	Escurrimiento, erosión, sedimento
MMF	Empírico/ Conceptual	Cuencas	Anual	Moderado	Escurrimiento, erosión
THORNES	Conceptual / Empírico	Cuencas	Anual	Moderado	Escurrimiento, erosión

EPIC	Físico	Cuencas	Continuo	Alto	Erosión
WATEM	Conceptual	Cuencas	Anual	Moderado	Erosión
SEDEM	Conceptual / Empírico	Cuencas	Anual	Moderado	Erosión
WEPP	Físico	Cuencas	Continuo	Alto	Escurrimiento, producción de sedimentos, pérdida de suelo
MIKE-11	Físico	Cuencas	Continuo	Alto	Producción de sedimentos, escorrentía
SHETRAN	Físico	Cuencas	Event	Alto	Escorrentía, tasas pico, producción de sedimentos
SEAGIS	Empírico/ Conceptual	Cuencas	Anual	Alto	Escorrentía, erosión, sedimentos
PESERA	Físico	Cuencas Medianas	Continuo	Alto	Escorrentía, erosión, sedimentos
SPL	Empírico/ Conceptual	Cuencas/ Ríos	Anual	Moderado	Erosión fluvial, socavación

Tabla 1: Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos. Adaptado de Merrit, 2003

2.4 ELECCIÓN DE MODELO

En los párrafos anteriores se mencionan los modelos de erosión que usan expresiones matemáticas para representar las relaciones entre los factores y procesos que ocurren en la superficie. Estos factores generalmente incluyen la topografía, variables meteorológicas, propiedades del suelo, y uso y cobertura de la tierra.

De los modelos mencionados en el capítulo 2.3, algunos se basan en la ecuación universal de pérdida de suelos USLE (Wischmeier & Smith, 1978) o han sido modificaciones de esta, tales como ANSWERS (Beasley, Huggins, & Monke, 1989), EPIC (Sharpley & Williams, 1990), SWAT (Arnold, 1996).

Para el desarrollo de la presente investigación se han considerado las conclusiones de la tesis de Saavedra (2005), quien emplea cuatro modelos de erosión (RUSLE, MMF, SPL, THORNES) para la misma área y utilizando productos satelitales de diferentes resoluciones. Llegando a determinar que para una baja resolución espacial (1 km) ningún modelo da resultados precisos, sin embargo, los rendimientos de los modelos se clasifican en el siguiente orden: SPL < USPED < RUSLE3D < THORNES < MMMF. Mientras que, para una mejor resolución (90 a 250 m), entendiéndose de escala media a fina, obtuvo resultados óptimos en las zonas desnudas y con poca cobertura vegetal pudiendo categorizarse de la siguiente manera SPL < USPED < THORNES < MMMF < RUSLE.

Baja Resolución		Mediana y Alta Resolución	
Orden	Modelo	Orden	Modelo
1	MMF	1	RUSLE
2	THORNES	2	MMF
3	RUSLE3D	3	THORNES
4	USPED	4	USPED
5	SPL	5	SPL

Tabla 2: Orden de rendimiento de modelos para baja resolución (izquierda) y mediana a alta resolución (derecha)

Con estos resultados, y ante similares características geomorfológicas de las cuencas de estudio en la tesis de Saavedra C. en la presente investigación, además de contar con una base de datos de mediana resolución para la cobertura vegetal, topografía y tipo de suelos, se ha considerado factible la aplicación del modelo RUSLE.

2.5 MODELO RUSLE

En principio, la ecuación USLE (Wischmeier & Smith, 1978) ha sido desarrollada para la determinar la erosión laminar del suelo a partir de una gran cantidad de muestras (10,000 parcelas aprox.) de datos experimentales, determinando su aplicación valida, pero restringida a un área de hasta 1 ha aproximadamente.

En 1985, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) decidió revisar la USLE para mejorar su desempeño. Como resultado, se desarrolló una nueva ecuación, la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (RUSLE) (Renard et al., 1997). Este modelo continúa con la estructura básica de la USLE, pero con ecuaciones para calcular los factores individuales con cambios significativos.

Estas ecuaciones son los modelos empíricos de erosión de suelo más utilizados a nivel mundial y fueron desarrollados para determinar la erosión no encauzada por unidad de superficie y año para largos períodos de tiempo.

La ecuación RUSLE se expresa en la siguiente ecuación de la siguiente manera, definido para el sistema métrico internacional:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Donde:

$A(ton\ ha^{-1}año^{-1})$: Pérdida de suelo promedio por erosión en una unidad de área

$R(MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}\ año^{-1})$: Factor de erosividad de la lluvia.

K ($\text{ton h ha}^{-1} \text{MJ mm}^{-1}$) : Factor erodabilidad del suelo que representa la pérdida de suelo por unidad de índice de erosión para un suelo especificado.

LS (*adimensional*): Factor longitud de pendiente que representa la proporción de pérdida de suelo del gradiente de longitud de pendiente.

C (*adimensional*) : Factor de cobertura vegetal que representa la proporción de pérdida de suelo de un área con algún tipo de cobertura o cultivo.

P (*adimensional*): Factor prácticas de control de erosión que representa la proporción de pérdida de suelo con una medida de protección a esta, generalmente artificial.

La ecuación RUSLE Donde se incorporan nuevos valores de R para condiciones áridas, métodos alternativos de estimación de K, nuevos métodos para calcular el factor C, utilizando subfactores, nuevas formas de calcular LS y nuevos valores de P.

2.5.1 Factor Erosividad (R)

El factor R es el factor de erosividad de la lluvia. Este factor indica el potencial erosivo de la lluvia que afecta en el proceso de erosión del suelo. Haciendo una analogía, se podría decir que una lluvia fuerte un día al año puede producir suficiente energía para erosionar el suelo que varias lluvias de mediana intensidad a lo largo de un año.

El factor erosividad (R) es definido como la sumatoria anual de los promedios de los valores individuales del índice de tormenta de erosión (EI30). Donde E es la energía cinética por unidad de área e I30 es la máxima intensidad en 30 minutos de precipitación. Esto se puede definir en la siguiente ecuación:

$$R = \sum (EI_{30})_i / N \quad (2)$$

Donde:

R : Erosividad anual

N : Tormentas erosivas (p.e. $P > 10 \text{ mm}$) en un periodo de N años

Por tanto, la energía de la tormenta (EI o R) indica el volumen de lluvia y escurrimiento, pero una larga y suave lluvia puede tener el mismo valor de E que una lluvia de corta y más alta intensidad. (Mannaerts, 1999).

La energía se calcula a partir de la fórmula de Brown y Foster:

$$E = 0.29 * (1 - 0.72 * \exp(-0.05(I))) \quad (3)$$

Donde:

E : Energía cinética de 1 mm de lluvia [MJ/ha*mm]

I : Intensidad de la lluvia en [mm/hr]

Clasificación de rangos típicos de R anual:

Clase	R (MJ/ha*mm/hr)
Muy Baja	< 500
Baja	500 - 1000
Mediana	1000 - 3000
Alta	3000 - 6000
Muy Alta	> 6000

Tabla 3: Rangos típicos del factor R anual

A partir de la ecuación anterior, el cálculo del factor R es un proceso complejo y requiere datos horarios o diarios de varios años. Por lo que se han desarrollado diferentes ecuaciones que adaptan la erosividad local mediante una fórmula que sólo requiera una data mensual o anual de precipitación.

A continuación, se muestran algunas de las fórmulas adaptadas para una precipitación media anual.

Autor	Fórmula		Lugar de aplicación
Bols (1978)	$R = \frac{2.5 * P^2}{7.3P + 73}$	R: Factor Lluvia (MJ*mm/ha*hr*año) P: Precipitación media anual (mm)	Indonesia, Malasia
Mikhailova et al. (1997)	$R = 7.562P - 3172$	R: Factor Lluvia (MJ*mm/ha*hr*año) P: Precipitación media anual (mm) P > 450 mm	Honduras
Torri et al (2006)	$R = 3.08P - 944$	R: Factor Lluvia (MJ*mm/ha*hr*año) P: Precipitación media anual (mm) P > 350 mm	Italia
Renard et al (1994)	$P \leq 850mm \ R = 0.0483P^{1.61}$ $P > 850mm \ R = 587.8 - 1.219P + 0.004105P^2$		USA
Yu et al (1996)	$R = 0.0483P^{1.61}$	R: Factor Lluvia (MJ*mm/ha*hr*año) P: Precipitación media anual (mm)	Sureste Australia
Eltaif et al (2010)	$R = 23.61e^{0.0048P}$	R: Factor Lluvia (MJ*mm/ha*hr*año) P: Precipitación media anual (mm) P ≈ 200 - 700 mm	Norte Jordania
Roose (1977)	$R = 0.5P$	R: Factor Lluvia (MJ*mm/ha*hr*año) P: Precipitación media anual (mm)	Oeste África (Senegal, Nigeria, Camerún)
Stocking et al (1976)	$R = 3.91P - 134$	R: Factor Lluvia (MJ*mm/ha*hr*año) P: Precipitación media anual (mm) P ≈ 400 - 800 mm	Sudáfrica
Cooper (2011)	$R = 0.27P^{1.26}$	R: Factor Lluvia (100ft-Ton*in/acre*hr*año) P: Precipitación media anual (in) P ≈ 250 - 2500 mm	Washington y Oregon (USA)

	$R = 0.82P^{1.09}$	R: Factor Lluvia (100ft-Ton*in/acre*hr*año) P: Precipitación media anual (in) P ≈ 150 - 2500 mm	California (USA)
	$R = 1.24P^{1.36}$	R: Factor Lluvia (100ft-Ton*in/acre*hr*año) P: Precipitación media anual (in) P ≈ 300 - 1900 mm	Este (USA)
Horni (1985)	$R = 0.562P - 8.12$	R: Factor Lluvia (MJ*mm/ha*hr*año) P: Precipitación media anual (mm) P ≈ 400 - 800 mm	Etiopía

Tabla 4: Fórmulas para el factor R a partir de precipitación media anual. Elaboración propia.

Se ha realizado una evaluación del comportamiento de estas fórmulas donde se consideran la variación de la precipitación anual, teniendo como resultado lo siguiente:

P _{anual} (mm)	Factor R (MJ.mm/ha.hr.año)											
	Bols (1978) Indonesia	Mikhailova (1997) Honduras	Torri (2006) Italia	Renard (1994) USA	Yu (1995) Sureste Australia	Eltaif (2010) Norte Jordania	Roose (1977) Oeste Africa	Stocking (1976) Sudáfrica	Cooper (2011)			Hurni (1985) Etiopía
200	65	-	-	245	222	62	1,702	-	62	132	349	104
400	134	-	288	747	677	161	3,404	1,430	148	282	897	217
600	202	1,365	904	1,435	1,301	421	5,106	2,212	247	438	1,556	329
800	271	2,878	1,520	2,280	2,068	-	6,807	2,994	355	600	2,301	441
1000	339	4,390	2,136	3,474	2,961	-	8,509	-	470	765	3,117	554
1200	408	5,902	2,752	5,036	3,972	-	10,211	-	592	933	3,994	666
1400	476	7,415	3,368	6,927	5,090	-	11,913	-	718	1,103	4,926	779
1600	545	8,927	3,984	9,146	6,311	-	13,615	-	850	1,276	5,907	891
1800	613	10,440	4,600	11,694	7,629	-	15,317	-	986	1,451	6,933	1,003

Tabla 5: Comparación tabular de las diferentes metodologías del Factor R, a partir de pp media anual

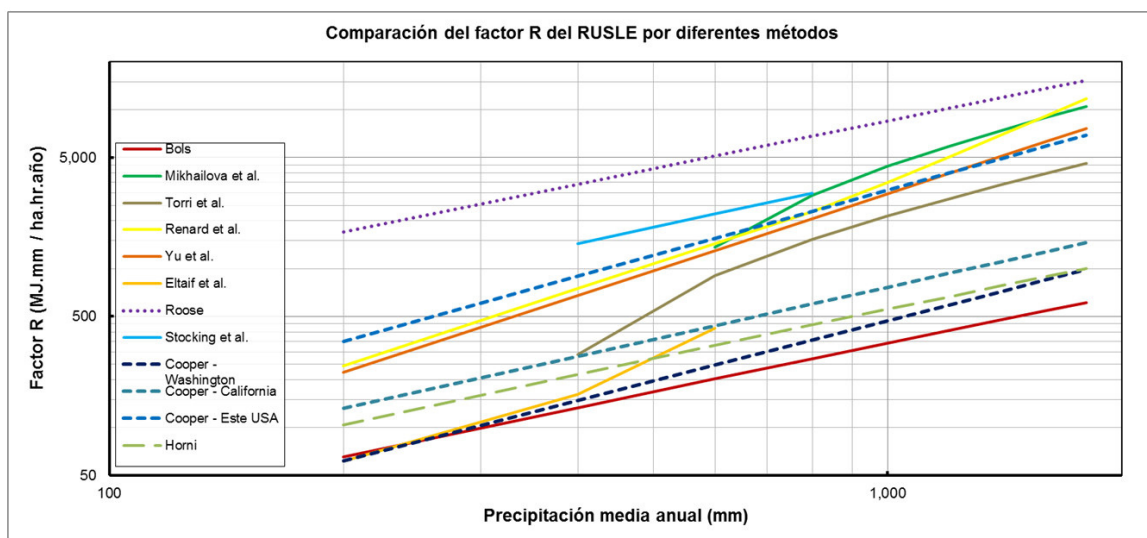


Figura 15: Comparación gráfica de las diferentes metodologías del Factor R, a partir de pp media anual

Si bien es cierto, se usa ampliamente una precipitación media anual para estimar el factor R debido a la escasez de información, para esta investigación se ha optado por

utilizar la fórmula desarrollada por (Wischmeier & Smith, 1978) debido a que se cuenta con una serie histórica de información de precipitación mensual desde 1981 al 2015 (véase capítulo 4.2) y considerando que el funcionamiento de la presa comienza en 1988. La fórmula es:

$$R = 1.735 * 10^{(1.5 * \log(Pm^2/Pa) - 0.08188)} \quad (4)$$

Donde:

R : Factor erosividad de lluvias en MJ*mm/ha*h*año
Pm : Precipitación mensual en mm
Pa : Precipitación anual en mm

2.5.2 Factor Erodabilidad (K)

A diferencia del factor R, el factor K muestra qué tan susceptible es el suelo a la erosión hídrica, esto es determinado por las propiedades físicas y químicas del suelo, que dependen de las características de estos.

Para determinar el factor K, existen una gran cantidad de fórmulas empíricas, adecuadas para diversos lugares del mundo y donde intervienen características del suelo como porcentaje de arena, limo, arcilla; estructura del suelo; contenido de carbono orgánico o materia orgánica; entre otros.

El factor K puede variar en una escala de 0 a 1, donde 0 indica suelos con la menor susceptibilidad a la erosión y 1 indica suelos altamente susceptibles a la erosión hídrica del suelo; cabe mencionar que esta escala fue hecha para el sistema de unidades americanas, y adaptándose al sistema internacional, la escala varía a normalmente entre 0 y 0.07.

A continuación, se muestran algunas ecuaciones para la estimación de este factor:

a) Wischmeier and Smith (1978)

$$K = \left[\frac{2.1 * 10^{-4} * M^{1.14} (12 - OM) + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)}{100} \right] * 0.1317 \quad (5)$$

Donde:

M : Factor textural $M = (msilt + mvfs) * (100 - mc)$
mc [%] : Contenido de arcilla (<0.002 mm)
msilt [%] : Contenido de limo (0.002 – 0.05 mm)
mvfs [%] : Contenido de arena fina (0.05 – 0.1 mm)

OM [%] : Contenido de material orgánica
 S : Clasificación de la estructura de suelo (s=1: Material muy fino, s=2: Material fino, s=3, Fragmentos gruesos, s=4: Bloques o en placas);
 P : Clasificación de la permeabilidad (p=1: muy rápido, ..., p=6: muy lento).

b) Auerswald, K. et. al. (2014)

$$\begin{aligned}
 K &= K_1 * K_2 + 0.043 * (A - 2) + 0.033 * (P - 3) \\
 K_1 &= 2.77 * 10^{-5} * \left(f_{Si+vfSa} * (100 - f_{Cl}) \right)^{1.14} \\
 K_2 &= (12 - f_{OM}) / 10
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Donde:

$f_{Si+vfSa}$: Porcentaje de limo más arena muy fina (2 - 100 μm)

f_{Cl} : Porcentaje de arcilla ($2 < \mu\text{m}$)

f_{OM} : Porcentaje de materia orgánica

B: Índice de la estructura del suelo (1 - 4), aumentando de muy fino a bloque.

C: Índice de permeabilidad (1 - 6) aumentando de rápido a muy lento.

c) Zhu et. al. (2014)

$$\begin{aligned}
 K &= \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 * S_d \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} * \left(\frac{S_i}{Cl + S_i} \right)^{0.3} \\
 &\quad * \left[1 - \frac{0.25 * C}{C + \exp(3.72 - 2.95 * C)} \right] \\
 &\quad * \left[1 - \frac{0.75 * SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.9 * SN)} \right]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Donde:

Sd : Porcentaje de arena

Si : Porcentaje de limo

Cl : Porcentaje de arcilla

C : Porcentaje de Carbono orgánico

SN : $1 - S_d / 100$

Esta ecuación da como resultado un factor K con unidades de (toneladas) acre hora [100 pies (ton) acre]⁻¹, por lo que el resultado debe ser multiplicado por 0,1318 para obtener el valor equivalente en unidades SI de ton*hm⁻²*MJ⁻¹*mm⁻¹.

d) Chaves et. al. (1996)

$$K = \frac{0.00043(AF + SIL)}{CO} + 0.000437 * AR + 0.000863 * SIL \quad (8)$$

Donde:

K : Erodabilidad del suelo (t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹);
 AF : % de arena fina en el horizonte A del suelo;
 SIL : % de limo del horizonte A del suelo;
 CO : % de carbono orgánico del horizonte A del suelo;
 AR : % de arena total del suelo.

e) Williams (1975):

$$K = \left[0.2 + 0.3 * \exp \left(-0.0256 * SAN * \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right) \right] * \left[1 - \frac{0.25 * CLA}{CLA + \exp(3.72 - 2.95 * CLA)} \right] \quad (9)$$

Donde:

SAN : Porcentaje de arena
 SIL : Porcentaje de limo
 CLA : Porcentaje de arcilla
 SN : 1 -SAN / 100

Además, también existen relaciones directas entre la textura del suelo y el contenido de materia orgánica con el factor K (Sabino, 2016).

El factor K al igual que en el factor R, se consideran límites de grados para reconocer qué tan susceptible es el suelo a ser erosionado.

Limitación de grados	Factor K: Erodabilidad (Ton.h/MJ.mm)
0: Nulo	≤ 0.010
1: Ligero	$0.010 \leq K \leq 0.020$
2: Moderado	$0.020 \leq K \leq 0.030$
3: Fuerte	$0.030 \leq K \leq 0.040$
4: Muy Fuerte	$K \geq 0.040$

Tabla 6: Rangos típicos del factor K anual (Giboshi, 1999)

2.5.3 Factor Topográfico (LS)

El factor LS expresa el efecto de la topografía local sobre la tasa de erosión del suelo, combinando los efectos de la longitud de la pendiente (L) y la inclinación de la pendiente (S). A medida que mayor sea la longitud de la pendiente, mayor será la cantidad de escorrentía acumulada y de la misma forma, mientras más pronunciada sea la pendiente de la superficie, mayor será la velocidad de la escorrentía, que influye directamente en la erosión.

Existen diversas metodologías basadas en SIG para calcular estos factores, como se pueden mostrar a continuación:

a) Jiang & Zheng (2008):

$$LS = 1.07 \left(\frac{\lambda}{20} \right)^{0.28} \left(\frac{\alpha}{10^\circ} \right)^{1.45} \quad (10)$$

Donde:

λ : Longitud de la pendiente a lo largo de la proyección horizontal (m)

*Resolución

α : Ángulo de inclinación (grados)

b) Arnoldus (1977):

$$LS = 1.07 \left(\frac{\gamma}{22.1} \right)^{0.6} \left(\frac{s}{9} \right)^{1.4} \quad (11)$$

Donde:

γ : Longitud de la ladera de la superficie (m) *Resolución

s : Pendiente de la inclinación (porcentaje)

c) McCool (1989):

$$\begin{aligned} S &= 10.8 * \sin \theta + 0.03 & \theta < 9\% \\ S &= 16.8 * \sin \theta - 0.5 & \theta \geq 9\% \\ L &= \left(\frac{\gamma}{22.1} \right)^m \end{aligned} \quad (12)$$

Donde:

θ : Ángulo de la pendiente de la inclinación (grados)

λ : Longitud de la ladera de la superficie (m) *Resolución

d) Moore & Burch (1985):

$$LS = (Flowacc * Res / 22.13)^{0.4} * (\sin \theta / 0.0896)^{1.3} \quad (13)$$

Donde:

Flowacc : Acumulación de flujo de las celdas que fluyen a causa de la pendiente

Res : Resolución del grillado (m)

Θ : Mapa de pendientes (grados)

e) Moore & Nieber (1991)

$$LS = (0.4 + 1) * \left(\frac{Flowacc}{22.13} \right)^{0.4} * (\sin \theta / 0.0896)^{1.3} \quad (14)$$

Donde:

Flowacc : Acumulación de flujo de las celdas que fluyen a causa de la pendiente

Θ : Mapa de pendientes (grados)

f) Desmet & Gobers (1996)

$$m = Erosiv * (\sin \theta / 0.0896) / (3 * \sin \theta^{0.8} + 0.56)$$

$$m = m / (1 + m)$$

$$x = |\sin(As)| + |\cos(As)|$$

$$L = \frac{(Flowacc + Cell_area)^{m+1} - (Flowacc^{m+1})}{Long_area^{m+2} * 22.13^m * x^m} \quad (15)$$

$$S = 10.8 * \sin \theta + 0.03 \quad \theta < 9\%$$

$$S = 16.8 * \sin \theta - 0.5 \quad \theta \geq 9\%$$

$$LS = L * S$$

Donde:

Erosiv : Erosividad en cárcavas *Dado el área de estudio se toma como valor 1

Θ : Mapa de pendientes (grados)

As : Aspecto-pendiente, muestra la orientación e inclinación de un terreno

Flowacc : Acumulación de flujo de las celdas que fluyen a causa de la pendiente

g) Wischmeier (1978)

$$LS = \sqrt{\frac{Flowacc}{22.13}} * (65.41 * (\sin \theta)^2 + 4.56 * \sin \theta + 0.065) \quad \theta > 50\%$$

$$LS = \left(\frac{Flowacc}{22.13} \right)^3 * \theta^{0.6} * (65.41 * (\sin \theta)^2 + 4.56 * \sin \theta + 0.065) \quad \theta < 50\% \quad (16)$$

Donde:

Flowacc : Acumulación de flujo de las celdas que fluyen a causa de la pendiente

Θ : Mapa de pendientes (grados)

En el caso de este factor, no existe un rango definido ya que depende del área de la cuenca y las características de esta.

2.5.4 Factor Cobertura Vegetal (C)

El factor C se utiliza para determinar la eficacia relativa de los sistemas de manejo del suelo y de los cultivos en términos de prevención o reducción de la pérdida de suelo. Este factor indica cómo la cobertura vegetal y los cultivos afectarán la pérdida media anual de suelos y cómo se distribuirá el potencial de pérdida de suelos en el tiempo (Rahaman, 2015).

El valor de C depende del tipo de vegetación, la etapa de crecimiento y el porcentaje de cobertura. Valores más altos del factor C indican que no hay efecto de cobertura y pérdida de suelo, mientras que el menor valor de C significa un efecto de cobertura muy fuerte que no produce erosión.

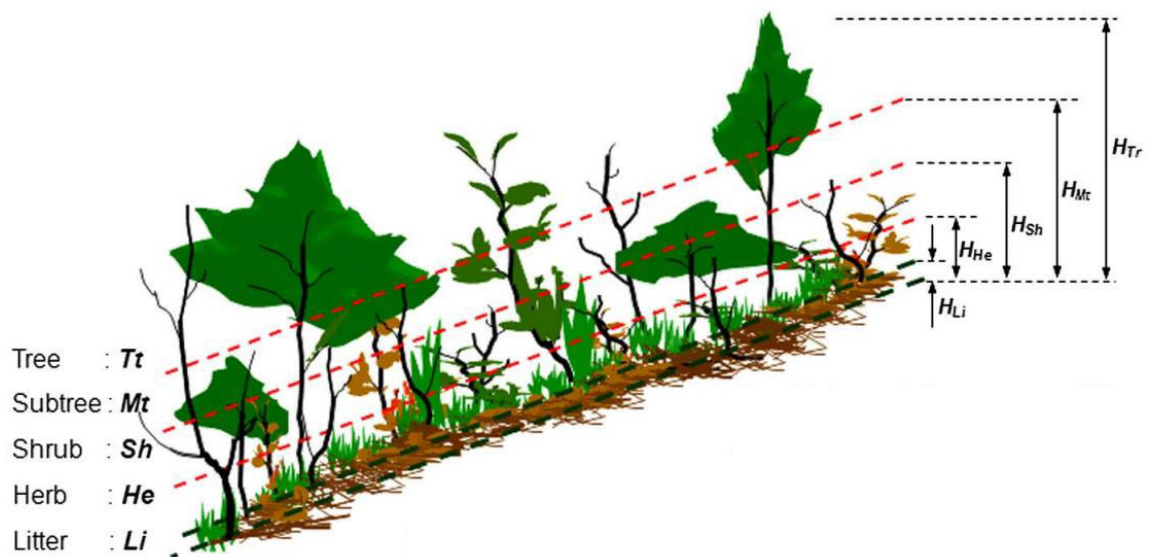


Figura 16: Impacto del poder erosivo ante la cobertura vegetal. Park, SD (2012)

Para el cálculo del factor C, existe una relación de pérdida de suelo por vegetación y manejo de residuos de cultivo que se calcula en base a 5 subfactores o prácticas parcelarias (Wischmeier & Smith, 1985; Liu et al., 2001).

$$SLR = PLU * CC * SC * SR * SM \quad (17)$$

Donde:

SLR : Relación de pérdida de suelo debido a la vegetación, cultivos y prácticas de arado de suelo.

PLU : Subfactor de uso de suelo previo.

CC : Subfactor de cobertura de dosel.

SC : Subfactor de cobertura de la superficie.

SR : Subfactor de rugosidad de la superficie.

SM : Subfactor de humedad del suelo.

Otra forma de hallar este factor C, es haciendo una comparación entre el NDVI a partir de las fórmulas Van de Kniff (1999) [C1] y su adaptación para países asiáticos, que también se adecúan a la realidad de la costa peruana de Lin (2002) [C2]. Por último se tiene la ecuación formulada por De Jong(1994) [C3] adaptado a estudios de degradación de suelos en un entorno mediterráneo

$$C1 = \exp[-2 * (\frac{NDVI}{1 - NDVI})] \quad (18)$$

$$C2 = (\frac{1 - NDVI}{2})^{1+NDVI} \quad (19)$$

$$C3 = 0.431 - 0.805 * NDVI \quad (20)$$

Donde:

NDVI : Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

2.5.5 Factor de Prácticas de Control de Erosión (P)

El efecto de las prácticas de control de erosión del suelo según (Wischmeier & Smith, 1978) es definida como la proporción de pérdida de suelo con una práctica de conservación específica con la pérdida de suelo en un cultivo.

Cuanto menor sea el valor de P, más efectiva será la práctica de conservación ante la erosión del suelo. (Flugel et al., 2003).

Las prácticas de control de erosión contemporáneas, consisten en labranza sin presencia de contornos, tiras de cultivos o terrazas. Es debido a esto que es complicada su detección a escala regional, y si bien según la Zonificación Ecológica Económica de la región Cajamarca, se han identificado las áreas donde existe un sobreuso, subuso y uso

conforme de suelos, mas no las prácticas que se realizan actualmente para su conservación¹.

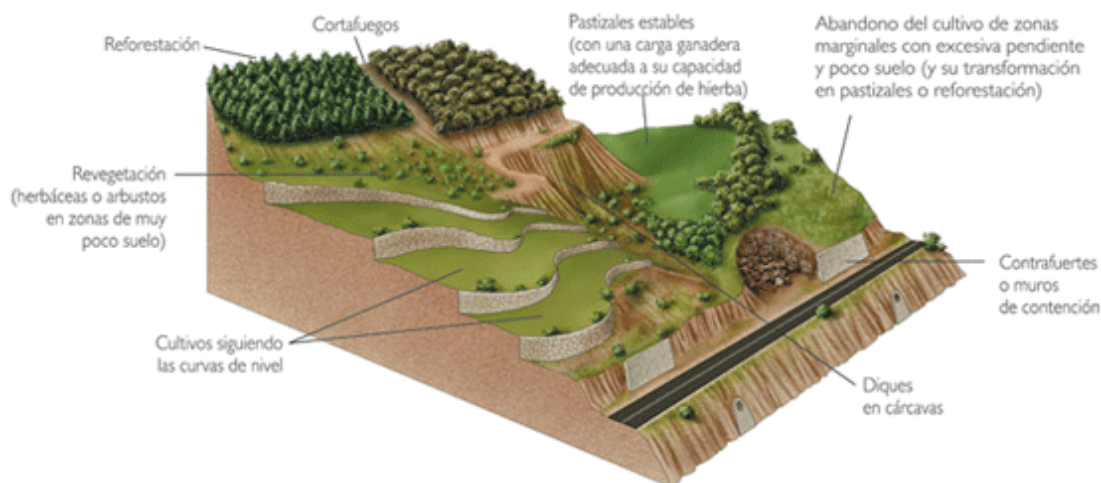


Figura 17: Ejemplos de prácticas de apoyo artificial

Lu (2013) realiza un estudio haciendo una comparación de valores del factor P, concluyendo que las influencias de las prácticas de conservación consisten en disminuir la longitud del declive efectivo para la escorrentía. Para esto acondiciona un cuadro de valores del factor P a partir de la pendiente de la superficie.

Pendiente (%)	Contorno	Cultivo en franjas	Terraza
0.0 – 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 – 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 – 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 – 26.8	0.90	0.45	0.18
26.8 >	1.00	0.50	0.20

Tabla 7: Valores del factor P para las distintas prácticas de control de erosión. (Wischmeier & Smith, 1978)

2.6 COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS (SDR) Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

La explicación al fenómeno de la erosión y la sedimentación se da por el movimiento de material sólido como producto de la erosión hídrica, este material (V) es calculado a partir de los modelos de erosión como RUSLE; sin embargo, no toda la erosión es trasladada aguas abajo como producto de la erosión hídrica en una cuenca, a esto se le conoce como material sólido real (Vs) que es un porcentaje de la erosión total de un punto en la cuenca hacia su área colectora.

¹ Los principales estudios y acciones de conservación de suelos a nivel nacional han sido desarrolladas por el Programa Nacional de Manejo de Cuencas y Conservación de Suelos (PRONAMACHCS).

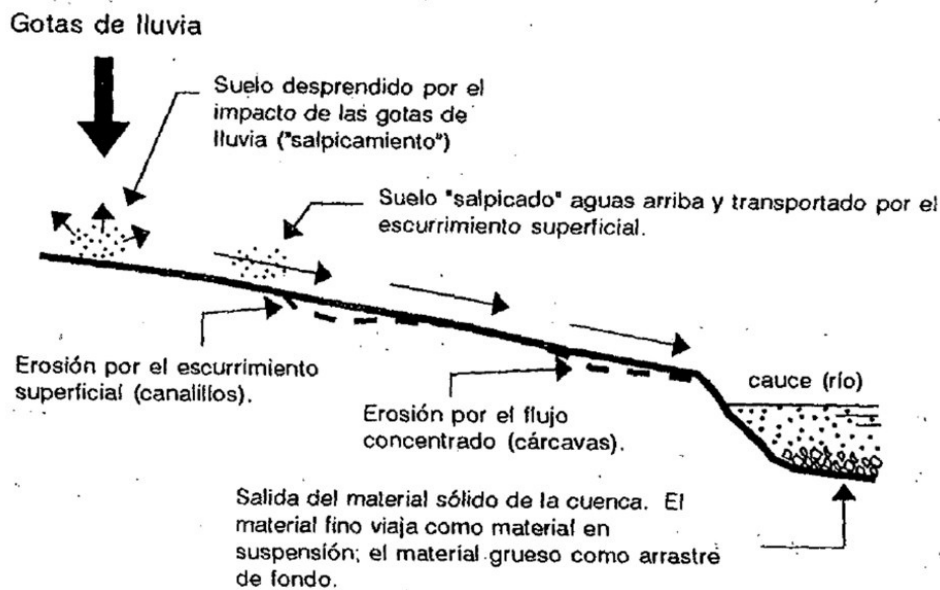


Figura 18: Explicación del fenómeno de erosión y sedimentación. Adaptado de Gracia Sanchez, J. - UNAM

El material sólido que deriva en un punto de la red hídrica de la cuenca (V_s) es una proporción de la erosión generada en toda la colectora de este punto. La cantidad de sedimentos que llega a este punto como acumulación de todo un año es a lo que se conoce como producción anual de sedimentos (Sediment Yield). Tradicionalmente se ha hallado este producto a partir de métodos directos:

a) Método Bureau of Reclamation

Formulada en cuencas del suroeste de los Estados Unidos, climas semiáridos.

$$V_s = \frac{1098}{A^{0.24}} \quad (21)$$

Donde:

A : Área de la cuenca (km^2)

V_s : Volumen de Sedimentos ($\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{año}$)

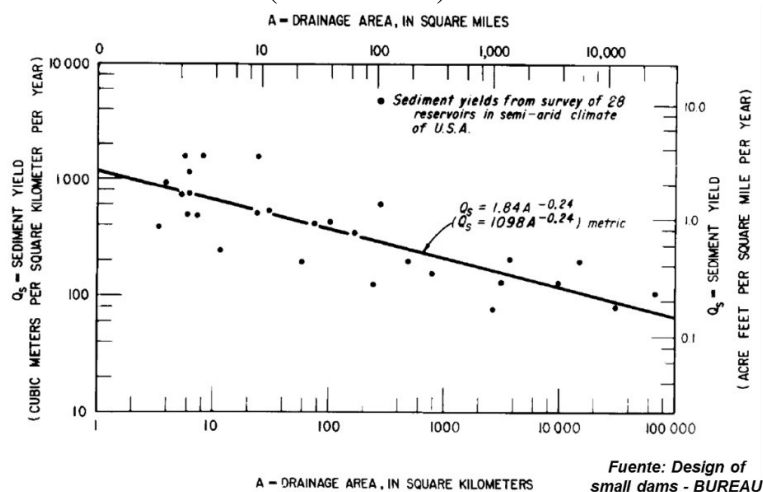


Figura 19: Método Bureau (Directo para la determinación de producción de sedimentos)

b) Método Gottschalk

Formulada en cuencas de los EEUU

Tamaños de Cuenca (km ²)	(SY) Producción media de sedimentos (m ³ /km ² *año)
< 25.9	1810
25.9 a 259.0	762
259.0 a 2590.0	481
> 2590.0	238

c) Método Namba

$$V_s = 0.292 P_m + 0.474 H - 0.118 F + 2.452 \quad (22)$$

Donde:

- V_s : Volumen de sedimentos (m³/km².año)
P_m : Precipitación media anual sobre la cuenca (mm)
H : Máximo desnivel de cotas en la cuenca (m)
F : Porcentaje de área con suelo desnudo respecto al área con vegetación (%)

d) Owen-Branson

Formulada en cuencas oestes al estado de Colorado en EEUU.

$$V_s = 19465 \frac{H}{L} + 14.29 A_d - 604.8 \quad (23)$$

Donde:

- V_s : Volumen de sedimentos (m³/km².año)
L : Longitud del cauce principal (m)
A_d : Porcentaje de área de suelo desnudo respecto al área total de cuenca (%)

Parte de una mejora de estas fórmulas viene a ser el coeficiente de entrega de sedimentos o Sediment Delivery Ratio en inglés (SDR), que es una estimación de la cantidad de suelo erosionado que alcanza los cuerpos de agua. El mismo puede ser estimado experimentalmente en el campo, asociado con el monitoreo de sedimentos. Si bien el SDR es una técnica fácil de aplicar, puede acarrear substanciales errores. El SDR se utiliza normalmente en los estudios sobre erosión y transporte para indicar hasta qué punto el suelo erosionado (sedimento) se almacena dentro de la cuenca. Como ya se ha mencionado, el SDR se define con la siguiente fórmula:

$$SDR = \frac{Y_s}{T_e} \quad \text{ó} \quad SDR = \frac{\text{Producción de Sedimentos Cuantificados}}{\text{Erosión Bruta de la Cuenca}} \quad (24)$$

Donde:

Y_s: Producción de sedimentos cuantificados ó Sediment Yield, en inglés

T_e: Erosión bruta de la cuenca, o Soil Erosion, en inglés

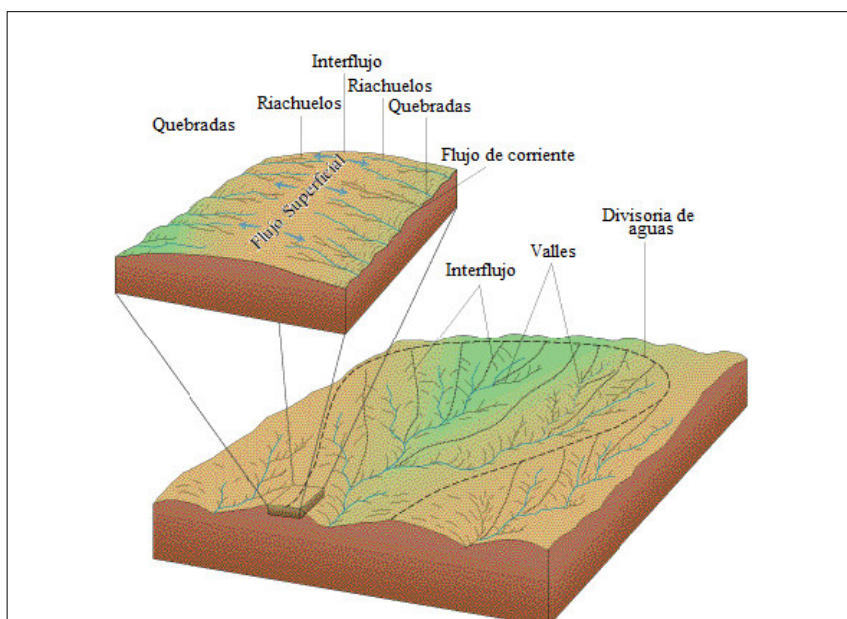


Figura 20: Esquema del comportamiento del flujo superficial en subcuencas. adaptado de Harmon, 2001

Donde la producción se determina a partir de la sedimentación de los embalses o de un centro de supervisión de los sedimentos, y la erosión bruta se determina utilizando técnicas de estimación como la ecuación universal de pérdida de suelo. (Gracia, 1997)

El SDR es siempre inferior a 1, lo que indica que el suelo que se erosiona no suele hacer grandes desplazamientos antes de quedar depositado. El SDR es muy variable, pero se trata de un concepto fundamental para comprender los procesos de erosión y sedimentación y la manera que en se producen en el tiempo y el espacio (Walling, 1983).

Existen muchas fórmulas teóricas de calcular este factor que dependen principalmente del área de la cuenca colectora, definiendo un porcentaje en relación a esta, de aquí se desprenden las siguientes fórmulas:

$$SDR = 0.4720 * A^{-0.125} \quad (\text{Vanoni, 1975}) \quad (25)$$

$$SDR = 0.5656 * A^{-0.11} \quad (\text{Boyce, 1975}) \quad (26)$$

$$SDR = 0.3750 * A^{-0.2382} \quad (\text{USDA, 1972}) \quad (27)$$

Donde:

SDR es el coeficiente de entrega de sedimentos y A el área de la cuenca en km².

El coeficiente de entrega de sedimentos SDR no solamente es afectado por el área, sino también por otras características geomorfológicas como la pendiente promedio del cauce principal, donde también aparecen otras ecuaciones:

$$SDR = 0.627 * S^{0.403} \quad (\text{Williams \& Berndt, 1977}) \quad (28)$$

Una investigación realizada por Park en 2007, indica que el SDR debe ser estimado con varias características de la cuenca y no sólo con un factor único debido al complicado mecanismo de producción de sedimentos. Finalmente, en el 2010 concluye en una ecuación que combina varias características de la cuenca:

$$SDR = a * Area^b * Pendiente^c * CN^d \quad (\text{Holland, 1975}) \quad (29)$$

Donde, a-d son coeficiente y exponentes, Área es el área de la cuenca (km²), Pendiente es la pendiente media de la cuenca (%), y CN¹ es el número de curva media de la cuenca.

¹ El Número de Curva es un parámetro empírico que se calcula con el método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EEUU. Considerando las condiciones de humedad antecedente (AMC) del suelo (seco, normal y húmedo) determinada a partir de la precipitación total en los cinco días previos. Se representa mediante un número adimensional, en curvas estandarizadas, las que varían entre 0 y 100; donde un área con CN = 0 no tiene escurrimiento y otra con CN = 100 es impermeable y toda la precipitación genera escorrentía.

2.7 VOLUMEN MUERTO EN PRESAS

Las presas al ser construidas en el cauce de un río, tienden a sedimentarse, lo cual reduce su tiempo de vida dependiendo de la producción que se haya producido aguas arriba.

Como se puede visualizar la figura 20, pertenece al embalse de Cordobilla, España; que desde la fecha que inició sus operaciones se ha sido sedimentando hasta perder el 98% de su capacidad.



Figura 21: Embalse Cordobilla (España) lleno de sedimentos

A continuación, se muestra un esquema del comportamiento de los sedimentos en una presa, proceso que se acentúa con el pasar de los años.

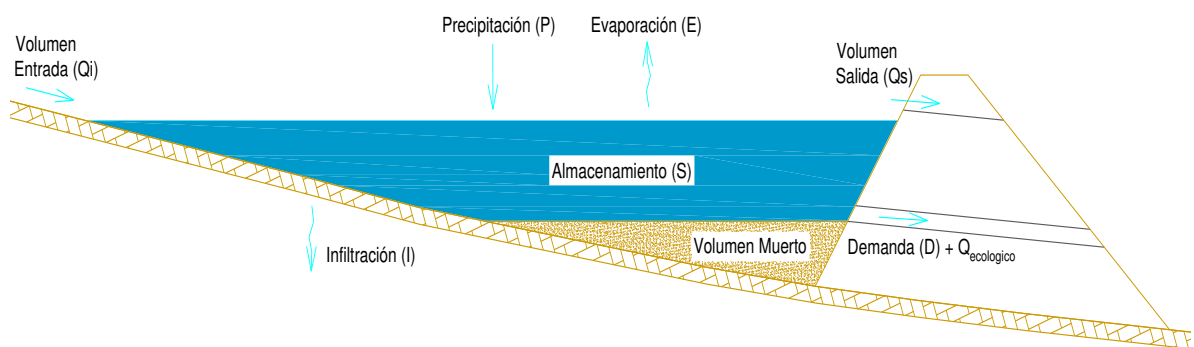


Figura 22: Esquema de una presa

La forma de calcular esta producción de sedimentos es la siguiente:

$$V_s * A * n = W \quad (30)$$

Donde:

V_s : Aporte Sólido (Ton/km².año)

A	: Área de cuenca (km ²)
n	: Vida útil de presa (años)
W	: Peso sólido total (Ton)

Y ahora para transformar el peso de los sedimentos producidos en volumen:

$$\frac{W}{\delta_{sum}} = V_{muerto} \quad (31)$$

Donde:

δ_s	: Peso Específico Sumergido (Ton/m ³)
V_{muerto}	: Volumen Muerto (m ³)

De esta forma, se tiene el volumen muerto en la presa. Todos los diseños de presas tienen una tubería de descarga por donde sale el caudal ecológico, que es el caudal mínimo que debe existir aguas abajo para preservar los valores ecológicos del mismo cauce. La cantidad de sedimentos evacuados por esta tubería es despreciable y no afecta en el volumen de sedimentos depositados en el fondo del embalse.

2.8 HIPÓTESIS

2.8.1 Hipótesis Primaria

El modelo de erosión RUSLE y ratio SDR permite estimar el volumen muerto de fuentes artificiales de abastecimiento de agua por producción de sedimentos Caso: Reservorio hídrico Gallito Ciego.

2.8.2 Hipótesis Secundarias

- La información espacial de acceso libre es suficiente para aplicar la ecuación RUSLE con óptimos resultados.
- La capacidad de almacenamiento del recurso hídrico de un reservorio es afectada por la proporción entre la erosión y producción de sedimentos que varía de acuerdo a las características físicas y climáticas de la cuenca.
- La metodología empleada permite la extrapolación de la estimación del volumen muerto acumulado en reservorios a cuencas con similares características climatológicas, siempre y cuando se valide con información batimétrica de los reservorios.

3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se muestran las características generales de las cuencas altoandinas, refiriéndonos en especial a la cuenca del río Jequetepeque, una cuenca representativa que cuenta con el segundo reservorio más grande del país (Reservorio Gallito Ciego), siendo elegida por la disponibilidad de información a manera de validar la metodología usada en el desarrollo de la Tesis. Este reservorio es parte del Proyecto Especial Jequetepeque Zaña, cuyo objetivo principal es la optimización del recurso hídrico, promover la siembra alternativa e incentivar la inversión privada con la finalidad de mejorar la calidad de vida de los habitantes de las cuencas.

3.1 ELECCIÓN DE CUENCA

En el Perú existen 159 cuencas, divididas en tres vertientes: Vertiente del Pacífico, vertiente del Atlántico y la vertiente endorreica del Titicaca. El Perú, a pesar de ser el 17 país con mayor disponibilidad hídrica, esta se encuentra repartida heterogéneamente, teniendo superávits en la vertiente del Atlántico y del Titicaca, y déficits en la vertiente del Pacífico, zona que alberga al 65 % de la población del Perú.

Teniendo esa premisa, el Perú cuenta con 743 presas inventariadas (ANA, 2015), 556 de las cuales se encuentran ubicadas en la vertiente del Pacífico.

Para contrarrestar la deficiencia de la disponibilidad hídrica, siendo un bien necesario en todas las actividades económicas, se opta por la creación de reservorios que almacenen agua durante todo el año y sea utilizado en época de estiaje, garantizando un mínimo de caudal todo el año para el uso multisectorial que se le dé.

Para la presente investigación, se ha tomado en consideración la disponibilidad de información y la representatividad de la cuenca de estudio, ubicando a la cuenca del río Jequetepeque como una cuenca con disponibilidad de información y que cuenta con el reservorio Gallito Ciego, cuya información es de utilidad para validar la metodología.

3.2 EXTENSIÓN Y UBICACIÓN

La Cuenca del río Jequetepeque se encuentra ubicada en la Vertiente Occidental de los Andes, se extiende desde los 0 a 4188.40 msnm. Geográficamente se encuentra comprendida, entre las coordenadas 6°45' a 7° 30' de Latitud Sur y 78° 00' a 79° 45' de Longitud Oeste y Políticamente se ubica en la región Norte del Perú, abarcando los Departamentos de La Libertad, Lambayeque y Cajamarca.

La cuenca tiene un área total de 4,372.50 km², la cuenca húmeda del Jequetepeque coincide con el área del presente estudio, comprendido desde la cabecera del reservorio, hasta la línea divisoria con las cuencas vecinas, con un área de 3,304.80 Km².

Administrativamente, esta cuenca corresponde a la Administración Técnica del Distrito de Riego del Valle Jequetepeque (ATDR).

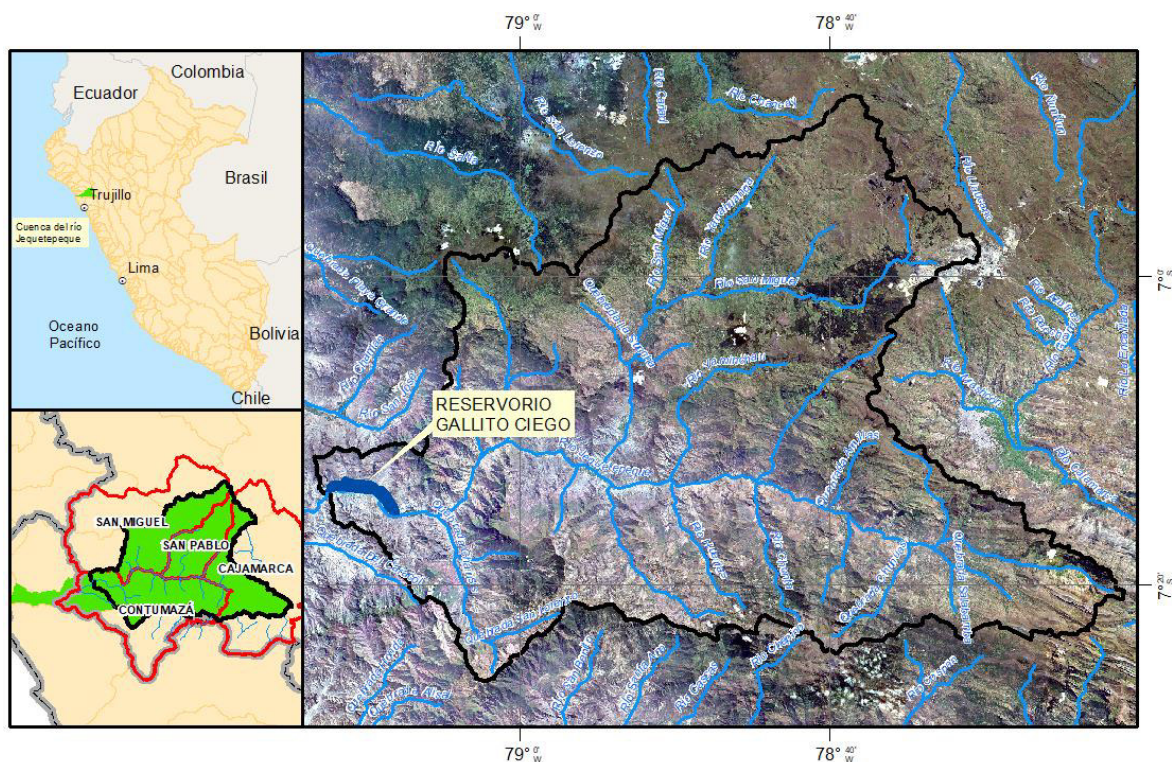


Figura 23: Ubicación del área de estudio

3.3 ACTIVIDADES SOCIOECONOMICAS

La cuenca del río Jequetepeque comprende 45 distritos, en las provincias de Chepén y Pacasmayo en La Libertad y las provincias de Contumazá, San Miguel, Cajamarca y San Pablo en el Departamento de Cajamarca.

En el ámbito de la cuenca, existen diferentes pisos ecológicos, zonas agroecológicas y ambientes homogéneos de producción, que permiten el desarrollo de una diversidad de cultivos. En la parte alta, la superficie cultivable es de 69675 Ha, sin embargo, por razones de disponibilidad de agua de lluvia se siembra hasta 22051.50 Ha por año. Entre los cultivos principales se tienen los pastos cultivados (66.48%), arroz (12.37%), maíz (8.34%) y productos de pan (8.03%) (INADE, 2005).

En el aspecto pecuario la parte alta de la cuenca, cuenta con 61580 vacunos, de los cuales el 59 % corresponden vacas que producen 13680 TM/año de leche; por otro lado, se cuenta con 66084 ovinos; 20430 porcinos; 27268 caprinos y 14920 equinos; siendo el principal rubro pecuario, la producción lechera. Esta producción ganadera está basada en dos sistemas o patrones: Sistema Familiar Campesino, al que pertenecen la mayoría de productores, y el Sistema Empresarial (INADE, 2005).

En la cuenca existen numerosas reservas de minerales a pequeña escala, pero con un valioso potencial. Siendo un caso en San Miguel, donde hay canteras de Caliche – arcilla para tejas y ladrillo y en Coshuro (distrito de Calquis), una mina de hierro y plata descubierta en 1868.

Se destaca el yacimiento minero de oro Yanacocha, ubicado en la provincia de Cajamarca, una mina muy rica y rentable cuya producción ha dinamizando la economía urbana de la capital departamental de Cajamarca y repercutiendo sobre la Cuenca del Jequetepeque por su ubicación en los límites de las Cuencas del Cajamarquino y el Llaucano.

En el ámbito de la cuenca existen 5 centrales hidroeléctricas, siendo la de mayor potencia instalada la CH Gallito Ciego, ubicada en la parte baja de la represa del mismo nombre, en el distrito de Yonán, esta infraestructura produce 34 MW. En cuanto a centrales térmicas, se ha encontrado 3 centrales, Magdalena con 50 KW para el servicio público, Sipán con 2,020 KW de servicio privado y Llapa con 50 KW también de servicio público.

En cuanto a comercialización, los ejes comerciales conforman la red económica principal de la cuenca que uniendo lugares como: San Miguel de Pallaques - San Pablo – Chilete; Contumazá – Chilete; Chepén - San Gregorio - San Miguel. Estos ejes han establecido relaciones de producción entre centros poblados de la zona alta, media y el valle, con las ciudades y centros productivos y comerciales de la costa ubicados en Chepén, Guadalupe, Pacasmayo. El flujo comercial principalmente se efectúa por vía terrestre, a través de las rutas existentes: Cajamarca Chilete Pacasmayo - y/o Chepen y Cajamarca - Contumazá - Cascas – Trujillo.

3.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

3.4.1 Climatología:

La cuenca del río Jequetepeque se encuentra bajo la influencia del clima del Pacífico y del Atlántico. Las precipitaciones relativamente escasas en la zona cercana a la Costa están influenciadas principalmente por la temperatura de las aguas marinas (corriente Peruana de Humbolt), mientras que las precipitaciones de la parte superior dependen, en parte, del clima de la cuenca del Amazonas y de la humedad proveniente del Pacífico. (SENAMHI)

El clima de la Cuenca Jequetepeque varía desde el típico árido y semicálido en el desierto costero (400 a 800 m s.n.m) hasta el pluvial y frío en el páramo pluvial andino (4 000 msnm). La temperatura media anual varía desde los 23 °C en el desierto costero hasta 3 °C el páramo pluvial andino. El promedio de precipitación anual varía desde los 15 mm en el desierto costero hasta los 1 100 mm en el páramo pluvial andino. La evaporación varía desde los 800 mm en el valle hasta 1 200 a 1 500 mm en la zona andina de la cuenca; la Humedad Relativa varía entre 80 a 90 % en el valle a 60% en la parte alta. Caracterizado el clima dentro de un marco general, según el mapa de zonas de vida del SENAMHI, la cuenca presenta ocho unidades bioclimáticas, acondicionadas por la complejidad del relieve, la altitud y el clima que varían desde zonas desérticas hasta per-húmedas, estas unidades son:

- Árido y Semicálido
- Transición de árido a Semiárido y Semicálido
- Semiárido y Semicálido Templado
- Seco y Semicálido Templado
- Seco y Templado
- Húmedo y Templado
- Muy Húmedo y Templado
- Pluvial y Frío

Para hallar la climatología del área de estudio se han recogido una serie de estaciones climáticas del SENAMHI con información de precipitación a escala diaria, hallándose un promedio medio mensual para cada mes y cada estación.

Código	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Ppmin (mm)	Ppmax (mm)
107018	Asuncion	-78° 30' 55.8"	-7° 18' 43.6"	2194	11.9	21.9	401.7	1649.7
107058	Chilete	-78° 50' 15.4"	-7° 12' 27.1"	859	21.3	29.7	309.1	1421.7
107052	Contumaza	-78° 49 ' 49"	-7° 21' 21"	2610	11.6	23.1	268.4	1561.7

107002	Granja Porcon	-78° 37 ' 36"	-7° 2' 2"	3261	3.7	16.6	482.5	1306.0
107061	Hacienda Llagaden	-78° 35 ' 1"	-7° 16' 1"	2150	14.8	25.4	384.1	1500.7
107032	Hacienda Tunad	-78° 43 ' 1"	-7° 10' 1"	1527	15.2	25.9	340.0	1222.3
100076	Lag. Compuertas	-78° 49 ' 1"	-7° 8' 1"	2236	14.1	23.5	325.4	1291.6
107099	Las Paltas	-78° 54' 4"	-7° 11' 28"	750	20.6	28.5	272.8	1382.6
107055	Lives	-79° 2' 2"	-7° 5' 5"	1800	10.3	22.2	665.5	1518.5
106019	Llapa	-78° 49' 49"	-6° 59' 59"	2900	7.1	17.3	472.3	1406.4
107017	Magdalena	-78° 39' 38"	-7° 15' 15"	1257	16.3	28.4	397.9	1499.5
107027	Monte grande	-80° 42' 1"	-5° 21' 1"	13	19.2	30.2	7.6	1246.9
106078	Quebrada Honda	-78° 39' 1"	-6° 54' 1"	3691	5.1	16.9	547.1	1323.3
107005	San Juan	-78° 29' 28"	-7° 17' 17"	2469	11.8	22.4	401.1	1377.6
105063	San Miguel	-80° 40' 55"	-5° 18' 14"	20	18.8	30.3	4.4	1558.5
107036	San Pablo	-78° 50' 50"	-7° 5' 5"	2100	11.5	20.8	333.4	1313.8

Tabla 8: Ubicación de estaciones climáticas. Fuente: SENAMHI

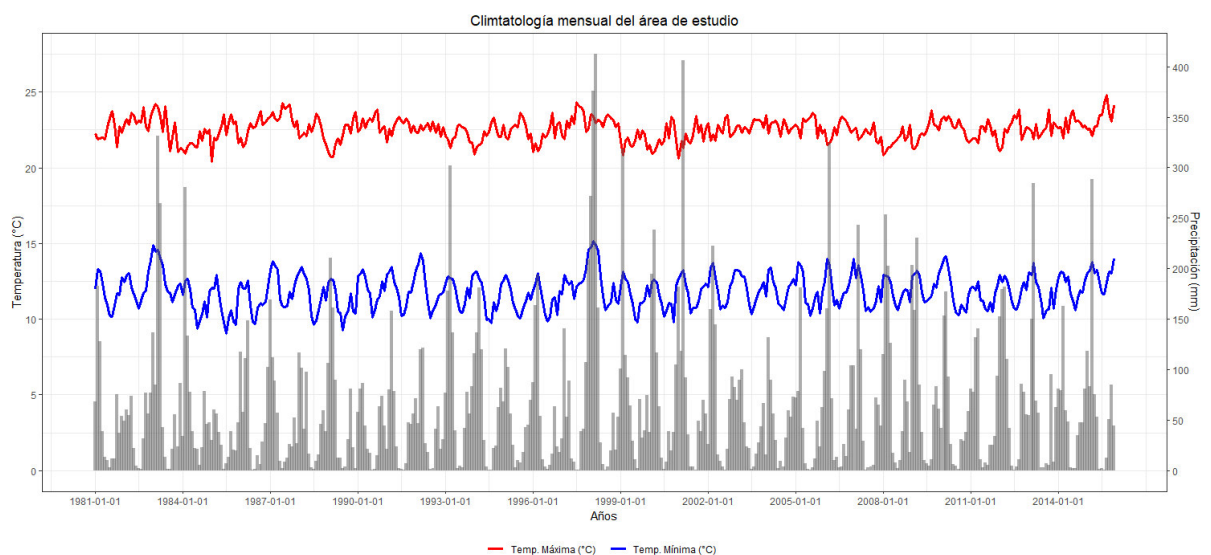


Figura 24: Climatología mensual en el área de estudio. Elaboración Propia.

La figura 22 muestra un boxplot de la serie histórica de la precipitación mensual para cada estación de la tabla 8, mostrando la variabilidad de la precipitación a lo largo de la cuenca del río Jequetepeque.

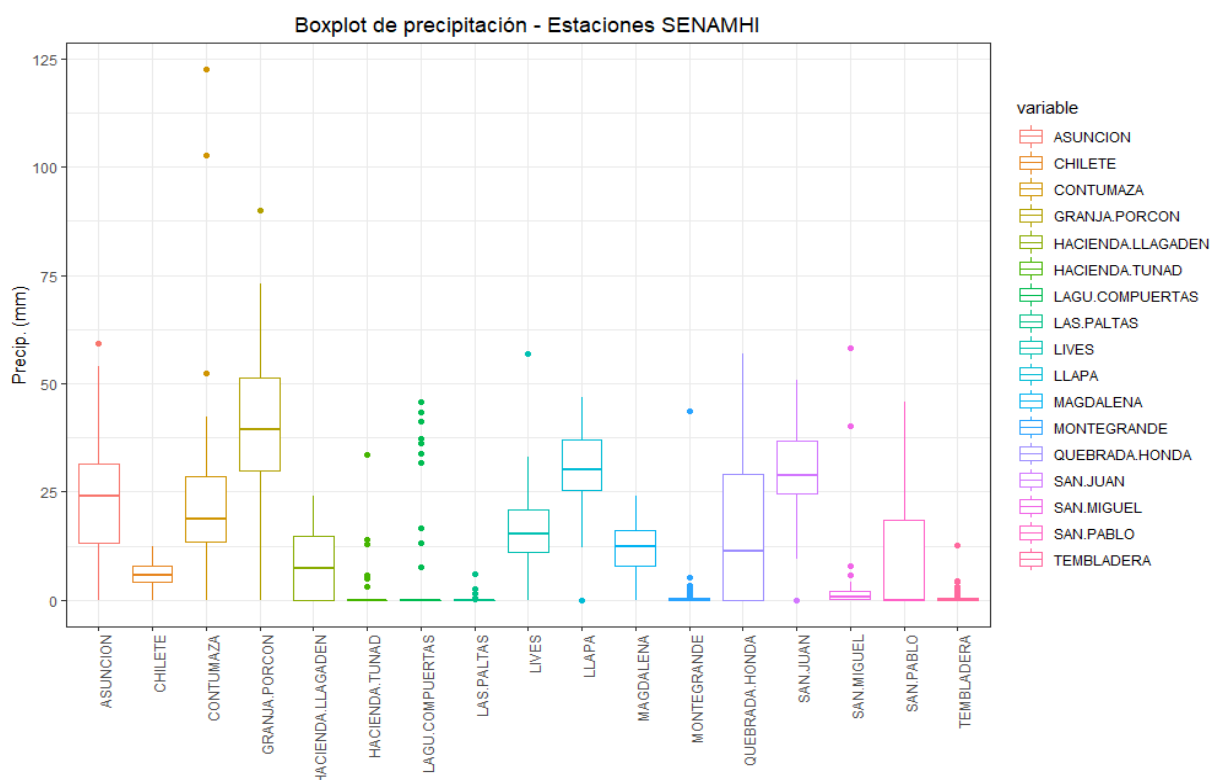


Figura 25: Boxplot de la precipitación media mensual en la cuenca Jequetepeque. Elaboración Propia.

3.4.2 Geología:

Para la geología del área de estudio, se han considerado los últimos eventos geológicos pertenecientes al Cuaternario, con una morfología generalmente plana y próxima a los cursos de agua, lo que ha permitido que los asentamientos humanos se ubiquen sobre estos materiales.

En el área de estudio se han localizado hasta 7 unidades superficiales.

- **Unidad Ifg: Depósitos Fluvio-glaciares:** Depositados principalmente sobre los 3500 msnm y constituidos por cantos y gravas sub-angulosas con matriz limo-areno-arcilloso.

- **Unidad Imo: Depósitos Morrénicos:** Localizados al noreste de la cuenca. Están constituidos por bolos, gravas y cantos subangulosos con matriz limo-areno-arcillosa.

- **Unidad Ia: Depósitos Aluviales:** Localizados en su mayor extensión en el abanico aluvial del río Jequetepeque, formados generalmente por bolos, cantos y gravas redondeadas a subredondeadas. Localmente presentan lentes areno limosos, permeabilidad media a alta, pendientes naturales menores de 10°.

- **Unidad If: Depósitos fluviales:** Localizados en el lecho mayor o de inundación del río Jequetepeque, litológicamente están formados por bolos, cantos y gravas

subredondeados, en una matriz areno-limosa, de granulometría variable, poco consolidada, permeabilidad alta, presencia de lentes arenosos y susceptible a inundaciones.

- **Unidad Ic: Depósitos Coluviales:** Son depósitos fragmentados y parcialmente descompuestos por la meteorización, depositados en depresiones y obstáculos en las laderas y en los piedemontes. Litológicamente formados por bolos, cantos y gravas angulosas en una matriz areno-limosa.

- **Unidad Ip: Depósitos Proluviales:** Mezcla de bolos (grandes dimensiones), cantos y gravas angulosas a sub-angulosas en una matriz areno-limosa. Generalmente localizados en la desembocadura de las quebradas y torrenteras.

- **Unidad Ie: Depósitos Eólicos:** Localizados en la pampa costanera formando dunas y médanos. Son arenas de grano fino a medio, no consolidados, de permeabilidad alta.

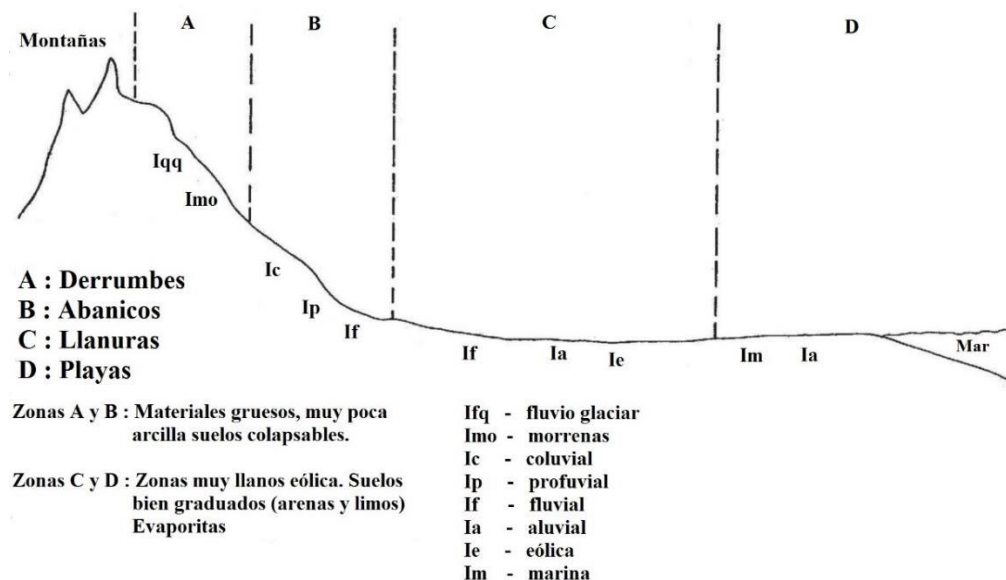


Figura 26: Ubicación de unidades superficiales en la cuenca. (INGEMMET, 1994)

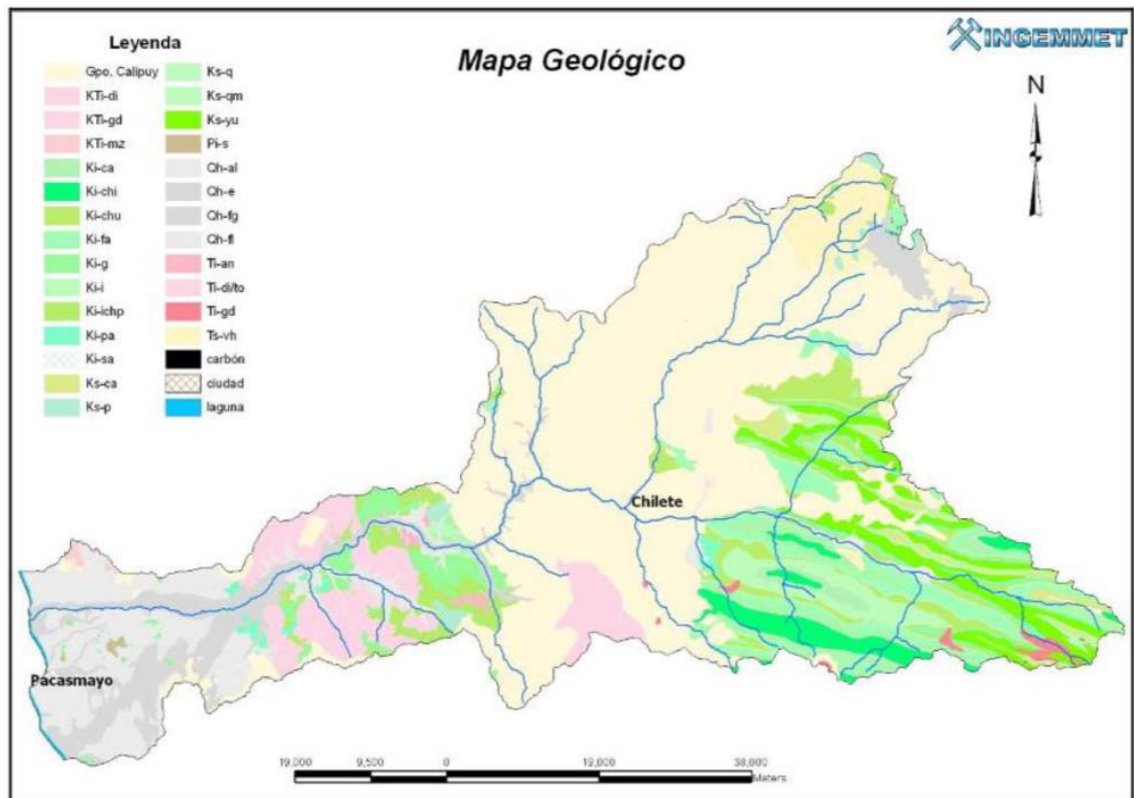


Figura 27: Mapa Geológico de la cuenca del río Jequetepeque. (INGEMMET, 2006)

3.4.3 Hidrogeología:

Las aguas subterráneas en la cuenca del río Jequetepeque se originan a partir de la infiltración de las aguas de lluvia y aportes de los cursos superficiales, que circulan direccionadas por la fuerza de la gravedad, y en casos excepcionales por presión hidráulica subterránea, la misma que permite la surgencia de aguas a superficie en forma de manantiales, fuentes termales y otros.

Cuando las aguas subterráneas en un acuífero tienen contacto con el basamento impermeable¹, condicionan su almacenamiento a manera de reservorios naturales o reservorios acuíferos; si presentan surgencias o afloramientos de aguas subterránea a superficie, evidencian la presencia de reservorios en el subsuelo.

La gestión de aguas subterráneas en el Perú es aún poco conocida, y existe una mínima práctica de desarrollo sustentable de este recurso.

¹ Basamento impermeable: Capa límite donde la permeabilidad es cero, o no permite el paso del agua y permite el escurrimiento subsuperficial.

Un estudio de la hidrogeología de esta cuenca se desarrolla por la necesidad de representar cartográficamente las características hidrogeológicas de las deformaciones geológicas y cuáles poseen aguas subterráneas con potencial para su prospección y explotación como reservorios acuíferos.

A diferencia del acuífero poroso no consolidado del piso de valle, donde sí se evidencian acuíferos potenciales, en la parte alta de la cuenca Jequetepeque existen escasas unidades hidrogeológicas potenciales; los acuíferos fisurados de altura se restringen a la presencia de materiales sedimentarios (areniscas cuarzosas y calizas) y materiales volcánicos (lavas andesíticas). Para profundizar, revisar “Boletín Hidrogeología en cuencas de los ríos Jequetepeque y Chamán”.

Dado que la presente investigación aplica la erosión por precipitación, no se considera el efecto de la producción de sedimentos en áreas cerradas como los acuíferos, que de por sí tienen un efecto despreciable como agente erosivo.

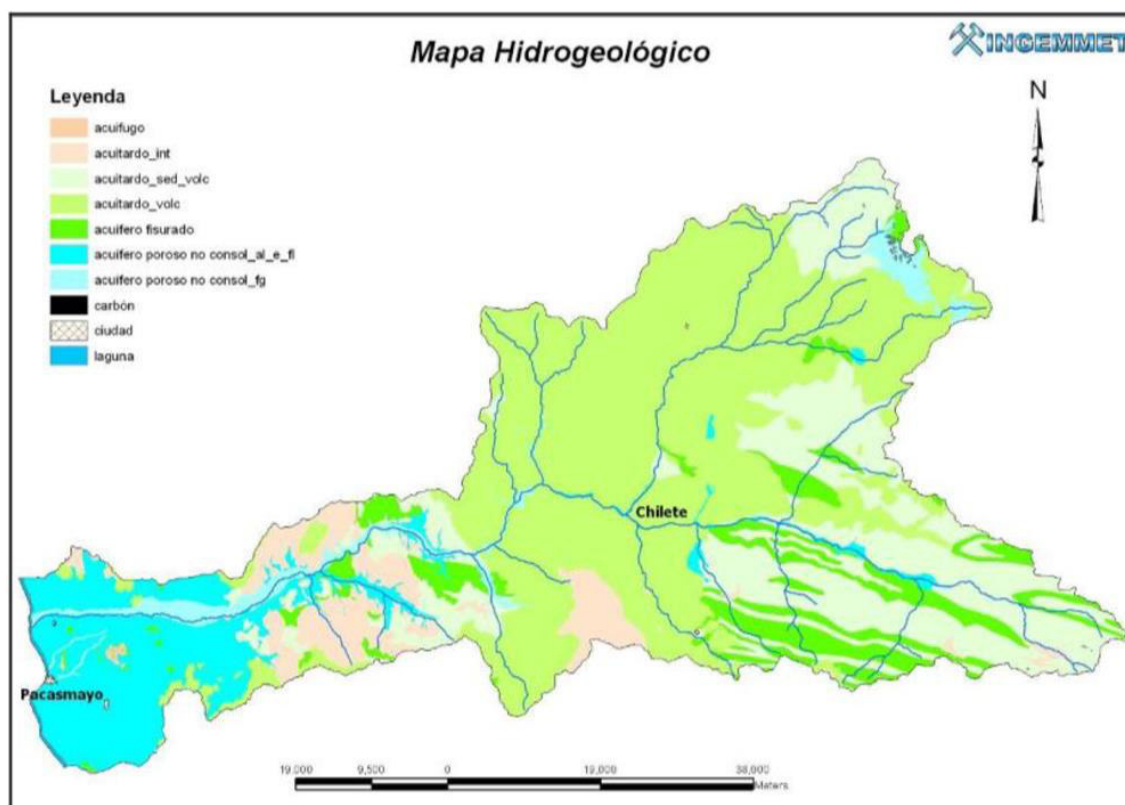


Figura 28: Mapa Hidrogeológico de la cuenca del río Jequetepeque. (INGEMMET, 2006)

3.4.4 Geomorfología:

La cuenca está influenciada por sus características geomorfológicas, especialmente por la pendiente de la cuenca, que retarda la escorrentía, asimismo la forma de la cuenca y el sistema de drenaje contribuyen en la acumulación del flujo, siendo este más rápido cuando mayor sea la densidad de drenaje y la forma se aproxime a la unidad en su coeficiente de compacidad.

Respecto a la relación entre las características geomorfológicas e hidrológicas de la cuenca es importante resaltar que la cuenca del río Jequetepeque hasta la estación Yonan, tiene un área total de 3304.80 Km²; un perímetro de 447. km, el río principal es de cuarto orden y drena las escorrentías superficiales o excedentes de la cuenca hacia el Océano Pacífico mediante el río Jequetepeque de 96.22 Km de recorrido.

Características geomorfológicas:

A continuación, se muestran las características geomorfológicas que se han sido calculadas para el área de estudio de la cuenca del río Jequetepeque. Siendo obtenidas a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) de la cuenca.

- **Parámetros de forma:**

- Coeficiente de Compacidad (Kc): El valor obtenido para la cuenca es de 2.18 que indica, para toda la cuenca, moderada tendencia a crecientes, mientras que en sus sub-unidades la tendencia es mayor.

- Forma de la Cuenca (Ff): El factor de forma hallado para la cuenca del río Jequetepeque, de 0.53, explica o describe su forma asimétrica y ligeramente alargada, es decir baja capacidad receptora de precipitaciones pluviales.

- **Altitudes características:**

La altitud media de la cuenca corresponde a la ordenada media de la curva hipsométrica, y su cálculo obedece a un promedio ponderado: elevación – área de la cuenca, en el caso de esta cuenca es de 2569.25 msnm, cuyos valores están relacionados con los altos volúmenes de precipitación, dada la comprobada relación precipitación-altitud, es decir que existe una eficaz contribución de lluvia sobre la cuenca del río Jequetepeque.

- **Número de Orden de los Ríos (n)**

La clasificación (orden) de la cuenca hidrográfica es función del número de orden o medida de la ramificación del cauce principal del río Jequetepeque. Se ha clasificado los cauces según el grado de ramificación, encontrándose que el río principal, río Jequetepeque es de cuarto 4° orden.

- **Grado de ramificación de los Ríos (Rb)**

-En base a la clasificación ordinal de los cauces se ha grado de ramificación que para el caso de la cuenca Jequetepeque es de 3 a 1.

- **Densidad de drenaje (Dd)**

-Los parámetros encontrados que relacionan la longitud total de ríos y el área de la cuenca y que promedian el valor de 0.60 Km/Km² (longitud total de ríos = 1932.65 km), indican que la cuenca del río Jequetepeque está bien drenada, y por consiguiente tiene una respuesta hidrológica satisfactoria frente a las precipitaciones pluviales.

- **Pendiente del Cauce Principal**

-El río Jequetepeque, en el tramo naciente-desembocadura, tiene una pendiente media de 1.85%, a partir de la sección de control Yonan su pendiente es de 2.03%.

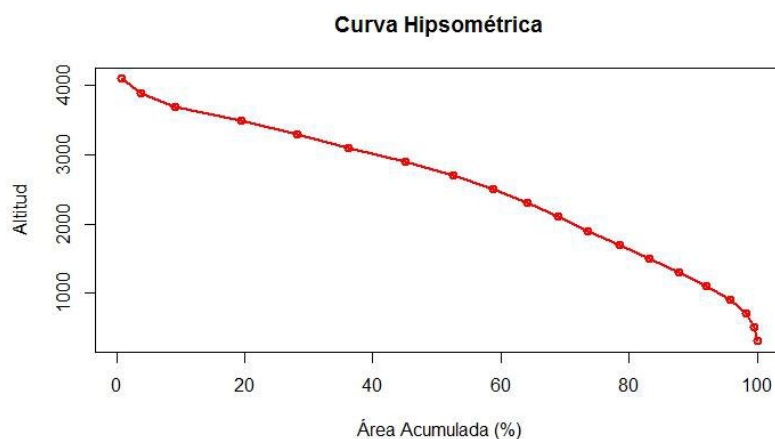


Figura 29: Curva hipsométrica del área de estudio (Elaboración Propia)

3.5 COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO

La vegetación natural en la cuenca es escasa debido la sobreutilización por el uso doméstico, agrícola y ganadero; sin embargo, podemos encontrar algunos lugares donde se observan bosques con relativa modificación.

En el cuadro siguiente se muestran las áreas y porcentajes de los diferentes grupos de cobertura de suelos:

COBERTURA VEGETAL	SIMBOLO	AREA (Ha)	%
Cultivos Agropecuarios	Cuap	110 753,57	18,64
Pajonales (ichu)	Pj	75 212,34	12,66
Matorrales	Ma	274 213,09	45,15
Bosque húmedo	Bh-m	5 085,22	0,86
Bosque seco	Bs-m	50 289,35	8,46
Planicies y estribaciones sin vegetación	Plce Sv	34 758,27	5,85
Planicies costeras sin vegetación	Plea Sv	42 480,20	7,15
Reforestación (Áreas reforestadas)	Rf	1 229,07	0,21
Lagos y lagunas	Lag	115,57	0,02
TOTAL		594 136,68	100,00

Tabla 9: Cobertura Vegetal de Suelo. (INADE, 2005)

3.6 RESERVORIOS

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) ha realizado inventarios de los glaciares, lagos y lagunas de todo el territorio peruano, asimismo también se ha realizado un inventario de presas. Pudiendo ser descargado libremente desde su geoservidor ¹.

Según estos inventarios, en la cuenca del río Jequetepeque se han ubicado 7 presas existentes, siendo la de mayor envergadura la presa Gallito Ciego.

Nombre de la presa	Río / Quebrada	Distrito	Provincia
Dique Río Rejo	Rejo	Cajamarca	Cajamarca
Gallito Ciego	Jequetepeque	Yonán	Contumazá
La Compuerta	Rejo / Laguna Compuerta	Cajamarca	Cajamarca
Laguna Alto Perú	Lagunas del Alto Perú	Tumbaden	San Pablo
Presa de Compensación – CH Gallito Ciego	Jequetepeque	Yonán	Contumazá
Quellaynishpo	Laguna Quellaynishpo	Tumbaden	San Pablo
Yanacocha 1(Relaves)	Rejo	Cajamarca	Cajamarca

Tabla 10: Presas en la cuenca Jequetepeque. Extraído del Inventario de Presas del Perú (ANA, 2015)

¹ Geoservidor Autoridad Nacional del Agua: <http://geosnirh.ana.gob.pe/geohidrov2/>

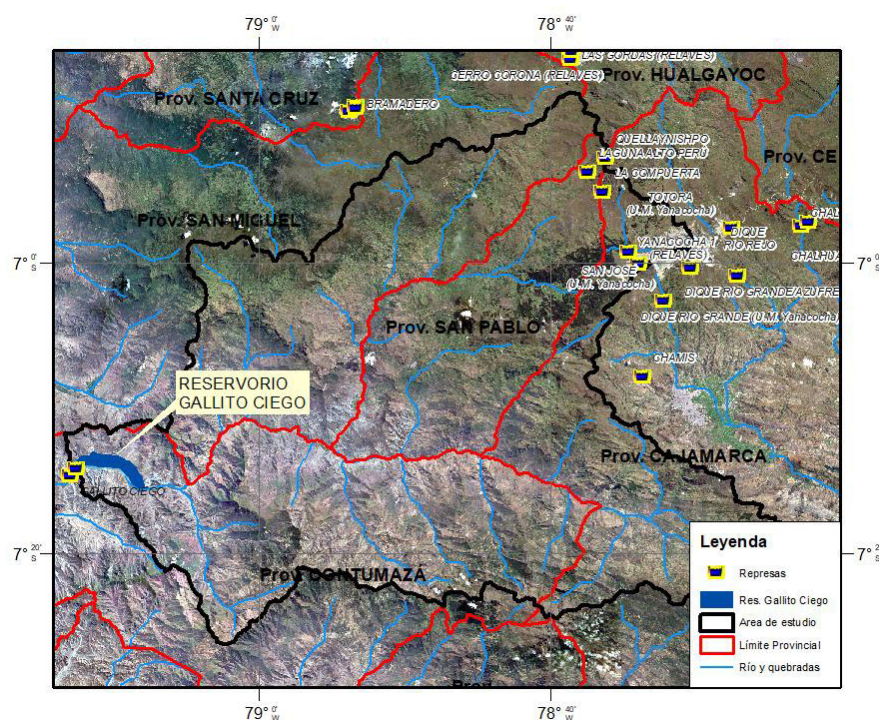


Figura 30: Ubicación de las represas en el área de estudio. Fuente: ANA. Elaboración propia.

3.6.1 Reservorios Gallito Ciego

Este reservorio se forma a partir de la represa Gallito Ciego, ubicada en el distrito de Yonán, provincia de Contumazá departamento de Cajamarca, en el kilómetro 33.5 de la carretera a Cajamarca.

Es el segundo reservorio más grande del país (después del reservorio de Poechos), la presa se localiza en un estrechamiento del valle con laderas inclinadas, formando un vaso de aproximadamente 12 km de largo y entre 1 a 2 km de ancho, cubriendo un área de aproximadamente 14.3 km², con un volumen total de almacenamiento de 638.10 millones de metros cúbicos (MMC) en octubre de 1988, al inicio de su operación. Sin embargo, operando con un volumen de 534 MMC a manera de prevención.

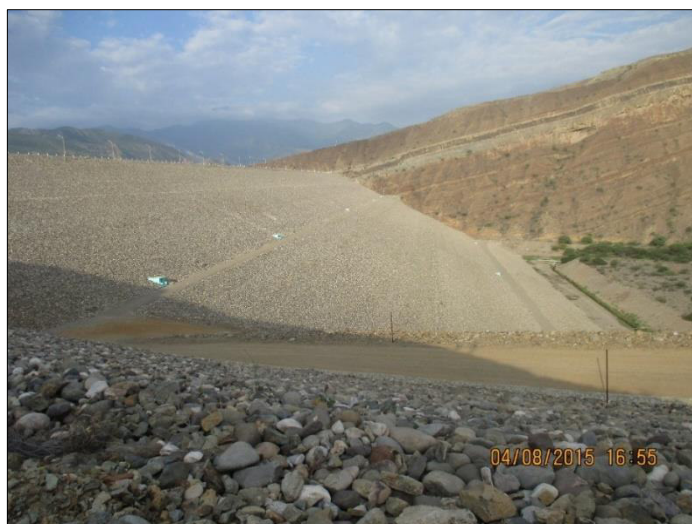


Figura 31: Vista de la presa trapezoidal Gallito Ciego. (ANA, 2015)

Características	Medidas
Área de la cuenca	4,230 Km²
Volumen anual medio de escorrentía	830 MMC
Nivel normal del Embalse	404.00 msnm
Nivel máximo en crecidas	410.30 msnm
Nivel muerto	361.00 msnm
Volumen de embalse muerto	117.90 MMC
Volumen útil del embalse	426.80 MMC
Volumen en sobreelevación en crecidas (404.0 – 410.3 msnm)	93.40 MMC
Volumen Total	638.10 MMC
Área de embalse nivel 404.00 msnm	13.2 Km²
Área del embalse nivel 361.00 msnm	Aprox. 12 Km
Pendiente media del río en la zona del reservorio	1 %

Tabla 11: Parámetros hidrológicos y geométricos de la presa. (ANA, 2015)

- **Régimen sedimentario del río Jequetepeque:**

Según los estudios de diseño de la presa por parte de las empresas Zublin y Salgitter de Alemania y Tizón Olaechea de Perú, en el año 1973 determinaron que durante un año promedio se depositaría en el embalse 1.7 MMC de sedimentos, que se repartirían en 1.20 MMC/año de material en suspensión y 0.50 MMC/año de material de fondo.

Sin embargo, en el “Plan de Ordenamiento Ambiental de la Cuenca del Río Jequetepeque” se determinó un transporte de sedimentos de 1.4 MMC/año en condiciones normales y en la ocurrencia del Fenómeno El Niño se determinó 32 MMC.

Los proyectos hidráulicos son los que hacen posible la vida en la costa peruana, dada la irregularidad y desigual distribución espacial de los recursos hídricos superficiales. La regulación de las aguas es fundamental para su aprovechamiento. Esto implica la conservación del volumen útil de los embalses durante el mayor tiempo posible.

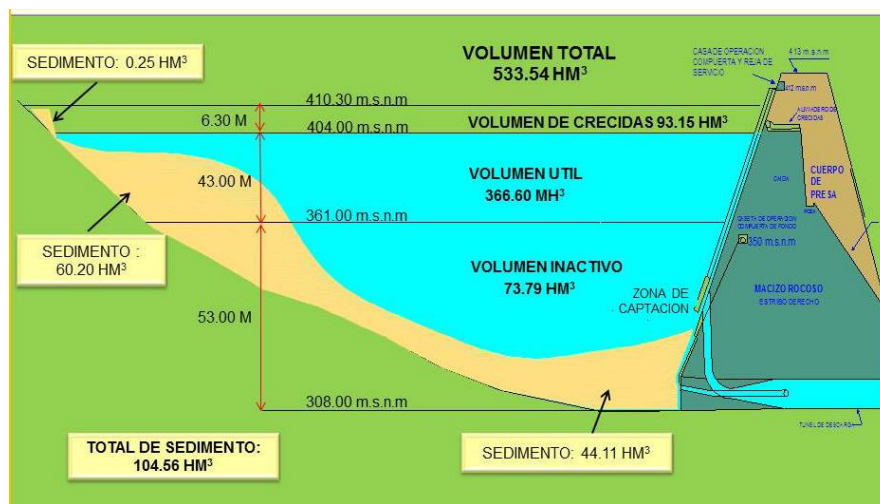


Figura 32: Esquema del embalse Gallito Ciego, 2013. (Adaptado de INADE)

4 GENERACIÓN DE BASE DE DATOS

Para la metodología que se utiliza y en concordancia con los objetivos de la investigación, la información espacial recopilada se encuentra en formato raster, las mismas que han sido descargadas de servidores globales de acceso libre y que servirán para el desarrollo de la investigación.

4.1 MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL

Un aspecto importante en el desarrollo de las investigaciones que tienen que ver con el ciclo hidrológico es la topografía, siendo el principal condicionante para la deposición de sedimentos en un punto de la red de un cauce, esta puede ser generada con un trabajo de campo para un trabajo con bastante nivel de detalle (topografía convencional), a partir de imágenes aéreas por estereoscopia (fotogrametría convencional) o a partir de percepción remota de las nuevas tecnologías. En este trabajo se ha evaluado el área de la cuenca como un factor en la búsqueda del mejor producto para la generación de topografía digital.

Se han considerado 3 productos de acceso libre, siendo:

DEM	Resolución	Inicio de Operación	Fuente
ASTER	30m / 15m	2002	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp
SRTM	90m / 30m	2000	Shuttle Radar Topographic Mission Data (SRTM) http://srtm.csi.cgiar.org/
ALOS	50m / 12.5m	2006	Advanced Land Observing Satellite https://vertex.daac.asf.alaska.edu/

Tabla 12: Productos de Modelos de Elevación Digital de acceso libre. Elaboración propia.

Se puede considerar trabajar con cualquiera de los productos mencionados, pero se optó por usar el producto SRTM de 30 m debido a su mejor precisión en terrenos escarpados y su procesamiento requiere de un costo computacional adecuado para una computadora de escritorio. Cabe señalar que uno de los inconvenientes de este producto se da cuando las superficies de agua producen una retrodispersión de radar muy baja y producen imágenes ruidosas. La superficie del DEM puede ser así "moteada" con valores de elevación negativos. Para esto, los píxeles de elevación faltantes se llenaron con valores derivados del área circundante usando la técnica "Fill skins" de la herramienta SAGA GIS (Wang & Liu, 2006), que no sólo rellena estos valores, sino también preserva la pendiente entre celdas, factor necesario para determinar el comportamiento de los sedimentos en un cauce.

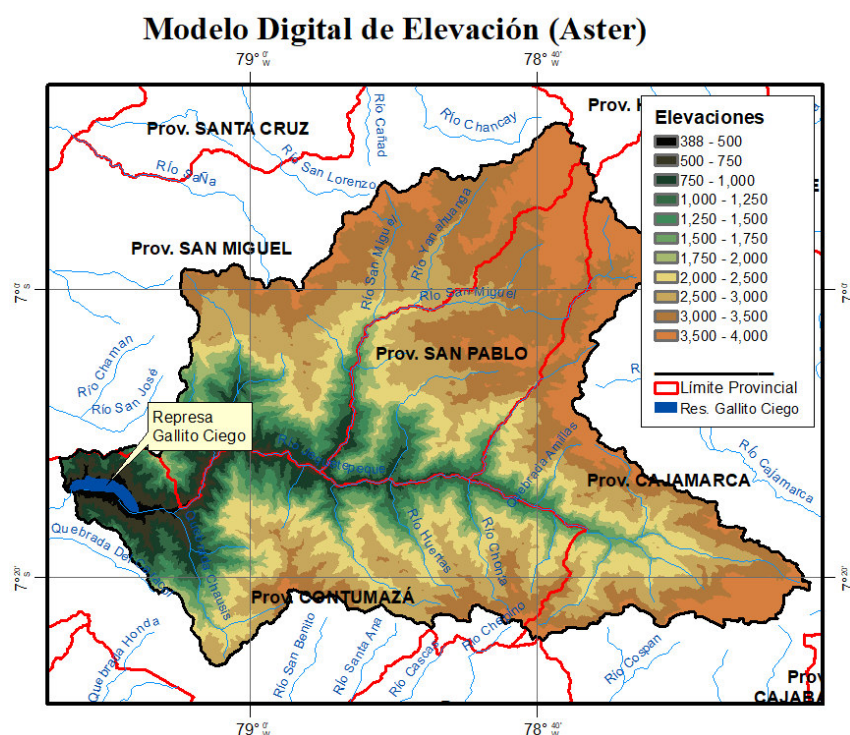


Figura 33: Modelo de Elevación Digital del área de estudio. (Elaboración propia)

4.2 PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN

La información hidrometeorológica, al igual que los modelos digitales de elevación, pueden ser obtenidas a partir de información medida en campo (estaciones meteorológicas del SENAMHI) o a través de productos satelitales:

PRODUCTO	NOMBRE	RES. ESPACIAL	RES. TEMPORAL	REFERENCIA
PERSIANN	Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks	0.25°	3 horas	Hsu et al, 1997
CMORPH	NOAA Climate Prediction Center (CPC) MORPHing technique	0.25°	3 horas	Joyce et al, 2004
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data	0.05°	Diaria	Chris Funk et al, 2015
TRMM*	Tropical Rainfall Measuring Mission	0.25°	3 horas / diaria / mensual	Robert Adler et al, 2007
GSMAP	Jaxa Global Rainfall	0.1°	1 hora	Okamoto et al, 2005; Kubota et al 2007
GPM	Global Precipitation Measurement	0.05°	1 hora	Eric Smith et al, 2007

Tabla 13: Productos satelitales de acceso libre de precipitación. Elaboración propia.

Como se observa en el cuadro, existen diferentes productos satelitales, variando la resolución temporal y espacial. Sin embargo, se optó utilizar producto desarrollado por SENAMHI denominado PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) que muestra la precipitación con una resolución espacial de 0.05° a nivel mensual, resultado de un proceso de validación de la información recogida por productos satelitales con información meteorológica medida in situ. (Lavado, 2016).

4.3 COBERTURA Y VEGETACIÓN

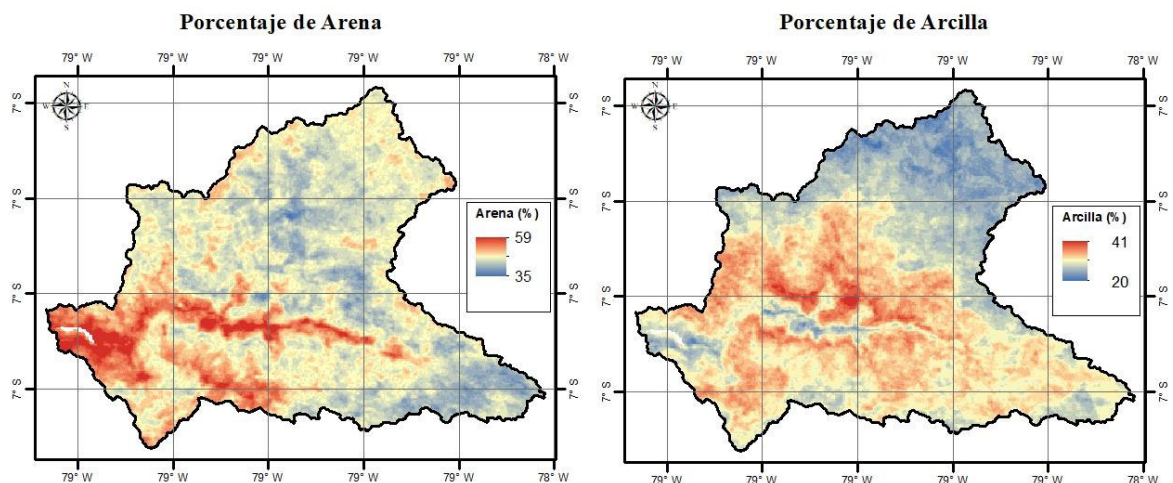
Los datos sobre la cobertura de la tierra y vegetación se vinculan a los procesos físicos de la tierra como la erosión o los procesos hidrológicos. Empíricamente se entiende que la tasa de erosión del suelo se reduce exponencialmente en función de la cobertura vegetal; sin embargo, la vegetación se cubre de manera temporal, lo que dificulta la medición en el campo,

especialmente en grandes áreas; por lo tanto, en esta situación se aplica comúnmente la percepción remota.

Para el presente estudio, se ha utilizado la información procesada por SoilGrids1Km, que ofrece mapas sobre propiedades y clase del suelo actualizándose periódicamente. Esta información se encuentra disponible a una resolución de 1km y a partir del 2017 a 250 m.

Los datos WorldSoil1km están disponibles a través del enlace <http://soilgrids.org/> o vía FTP <ftp://ftp.soilgrids.org/> (Hengl, 2017) y a partir de esta plataforma se ha podido obtener la información del suelo como porcentaje de arena, limo y arcilla; así como de contenido de carbono orgánico.

- **Contenido de carbono orgánico en el suelo (% del peso del suelo):** Es la porción de una muestra de suelo que pasa a través de un tamiz de 2 mm.
- **Contenido de arcilla (% del peso del suelo):** El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro equivalente y menor a 0.002 mm.
- **Contenido de limo (% del peso del suelo):** El porcentaje de partículas del suelo que tienen un diámetro equivalente entre 0.05 y 0.002 mm.
- **Contenido de arena (% del peso del suelo):** El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro entre 2.0 y 0.05 mm.



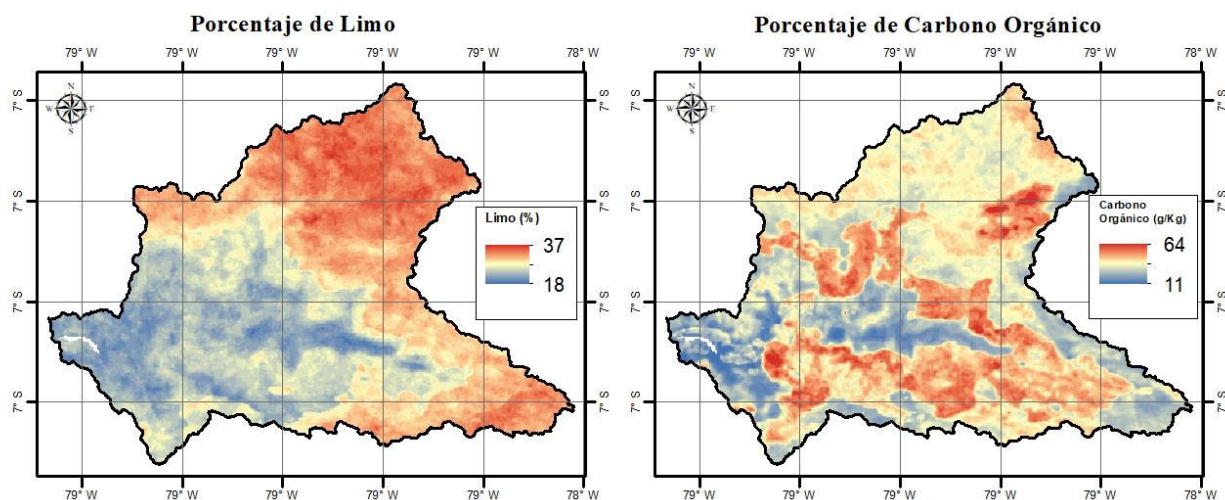


Figura 34: Porcentaje de tipo de suelo según textura. Elaboración propia
Fuente: SoilGrids (<http://soilgrids.org/>)

En la figura 31 observamos la cuenca del río Jequetepeque presentando mayores proporciones de arena en las áreas más cercanas a los ríos, debido a que el comportamiento de las partículas de mayor tamaño se concentra generalmente en los fondos de los valles; en cuanto al suelo con mayores porcentajes de limo y arcilla, la distribución es más heterogénea.

Además, también es necesaria la información de cobertura de suelo, esta puede ser obtenida a partir de una clasificación de imágenes satelitales de algún producto que permita diferenciar a partir de sus bandas el comportamiento radiométrico del cuerpo que se evalúe, pudiendo ser una imagen Landsat, Sentinel, Aster, etc. Además, existe un producto desarrollado en China, denominado GlobalLandCover30, que muestra una clasificación de los cuerpos presentes en toda la superficie del planeta, a una resolución de 30 metros. (Chen, 2014).

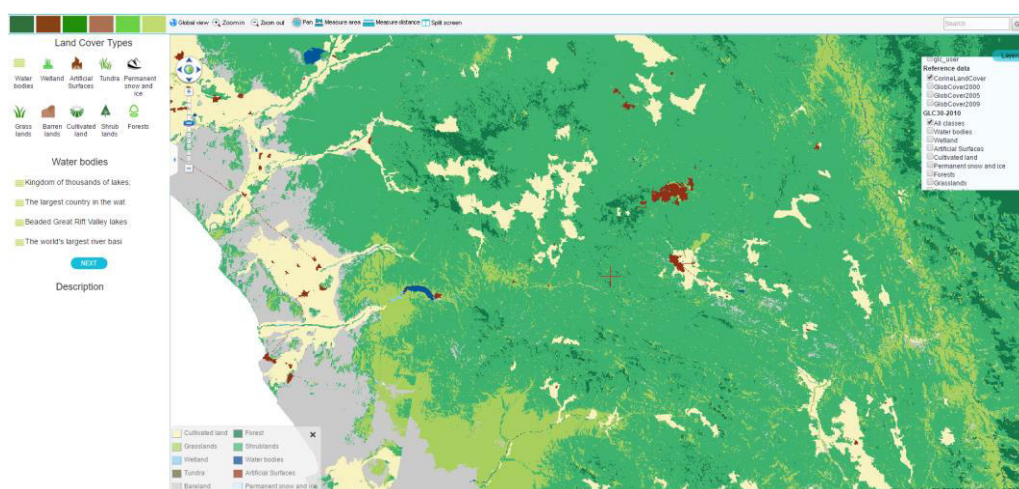


Figura 35: Geoportal GlobalLandCover (GLC30)
Fuente: www.globallandcover.com

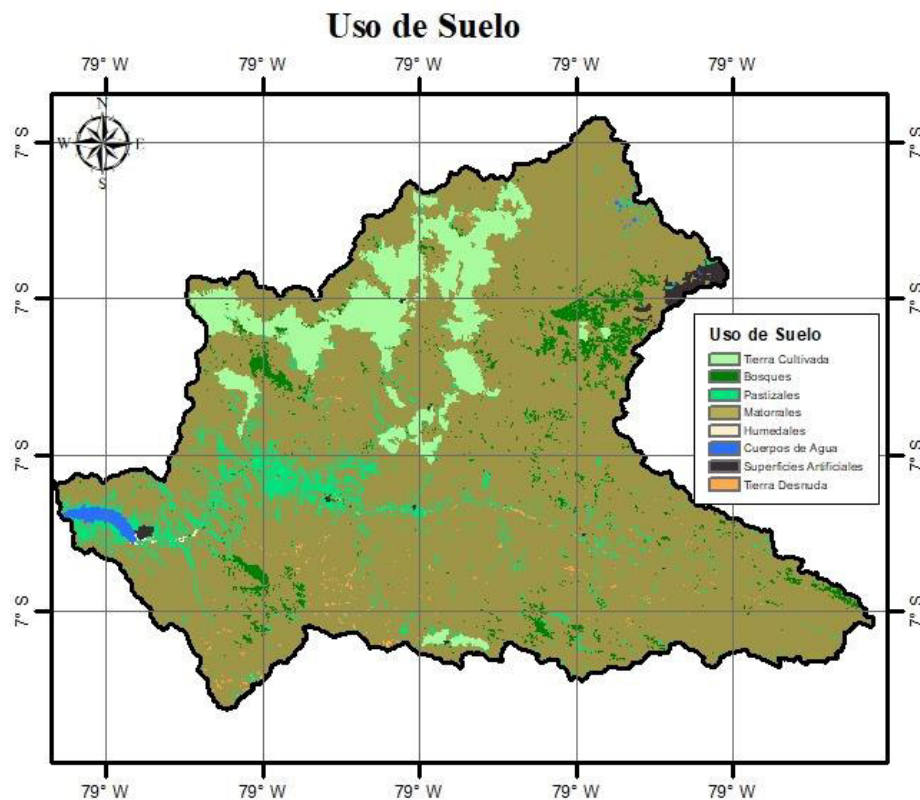


Figura 36: Uso de Suelo, según GLC30. Elaboración propia

La clasificación de los diferentes tipos de suelo con este producto, se entiende que más del 60% es un tipo de suelo de matorrales, seguido de tierra cultivable. Entendiendo que es una información sesgada, se ha tomado en consideración otras fuentes de mayor fiabilidad.

La cobertura vegetal también puede ser calculada a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y esto puede ser obtenido de imágenes Modis, Spot o Landsat, como el caso de esta investigación.

Debido a que el NDVI a lo largo del tiempo tiene un régimen estacionario bastante variable a lo largo del año, este depende de la fenología de las plantas y tiene un mayor contraste a lo largo de los años, por lo que se hace necesario considerar una serie de tiempo de NDVI. El producto de NDVI aplicado para esta investigación ha sido tomado a partir de la herramienta Google Engine, lo cual permite evaluar el producto de NDVI anual para el rango de fechas entre 1984 y 2015, como resultado de los productos Landsat 4, 5 y 7.

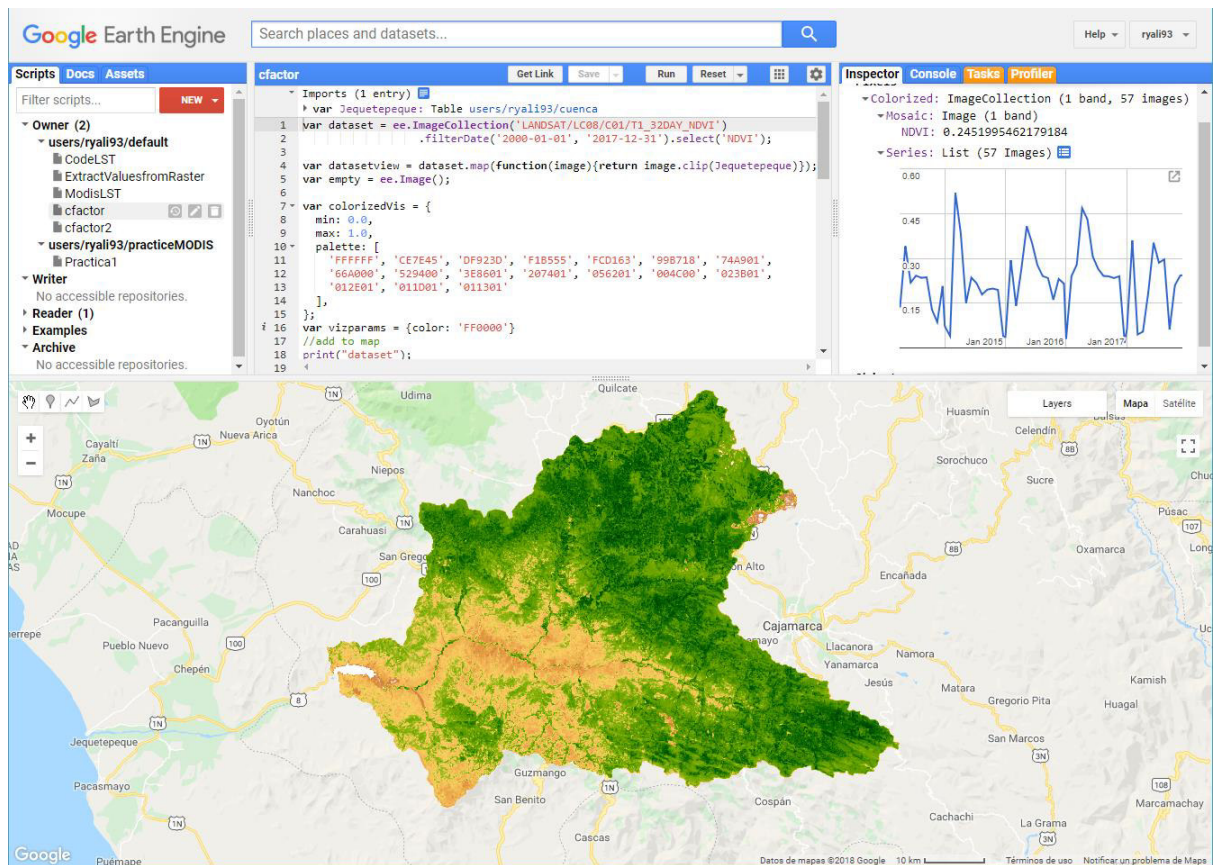


Figura 37: Aplicación de Earth Engine para la descarga de NDVI. Fuente: Elaboración propia.

4.4 INFORMACIÓN DE VALIDACIÓN

Para el proceso de validación, se requiere es el volumen de sedimentos que se ha depositado en el fondo del reservorio Gallito Ciego. Para esto, se ha recopilado antecedentes de estudios batimétricos, los cuales han sido proporcionados por una coordinación entre la Autoridad Nacional del Agua y el Proyecto Especial Jequetepeque Zaña (PEJEZA). Pudiendo de esta forma, adquirir las batimetrías realizadas en el reservorio en los años 1998, 1999 y 2007. Además, se tiene los datos de los estudios de factibilidad y licitación, de los años 1973 y 1975 respectivamente, que estiman el volumen muerto en el reservorio por año antes del inicio de operaciones.

	Factibilidad Año 1973	Licitación Año 1975
Sedimento en Suspensión	1.25 MMC/año (71 %)	1.20 MMC/año (71 %)
Sedimento de Arrastre	0.50 MMC/año (29 %)	0.50 MMC/año (29 %)
Total Anual	1.75 MMC/año	1.70 MMC/año

Tabla 14: Estudios previos de evaluación de sedimentación. Fuente: PEJEZA

El Estudio determina un volumen muerto de 86 MMC, un volumen útil de 400 MMC y una vida útil del embalse Gallito Ciego de 50 años (86 MMC/1.7 MMC).

Levantamiento topográfico batimétrico	Volumen total MMC
Estudio inicial año 1991	-
Levantamiento 1993 PEJEZA	17.22
Levantamiento 1999 PEJEZA	64.26
Levantamiento 2000 PEJEZA	64.48
Levantamiento 2006 HyO Ings.	80.21
Levantamiento 2007 HyO Ings.	82.17
Levantamiento 2010 HyO Ings.	92.65
Levantamiento 2013 HyO Ings.	104.56

Tabla 15: Sedimento total retenido en el embalse Gallito Ciego. Fuente: PEJEZA

Esta información, ha sido contrastada con diferentes investigaciones, dando cuenta que la medición del volumen de sedimentos es un proceso complejo que requiere una batimetría muy precisa dado el comportamiento de los materiales sólidos en el fondo del reservorio.

5 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la presente investigación engloba los procesos de erosión, la proporción entre la erosión y sedimentación, y la producción de sedimentos como peso, volumen y su traducción a tiempo de vida de una presa. Se han utilizado los factores del modelo RUSLE, tomándose diferentes fuentes para cada factor, así como ecuaciones del modelo SATEEC (System for Spatiotemporal Analysis of Soil Erosion and Sediment Yield) y se han utilizado los siguientes programas de código abierto y con licencia GNU (General Public License):

- Entorno Qgis, para la realización de mapas temáticos para para la evaluación, así como la presentación de mapas temáticos.
- Entorno SAGA GIS para realizar procesos de ecuaciones complejas para determinar algunos factores.
- Lenguaje de programación en R, para definir las ecuaciones a un nivel distribuido, así como la presentación de gráficos.

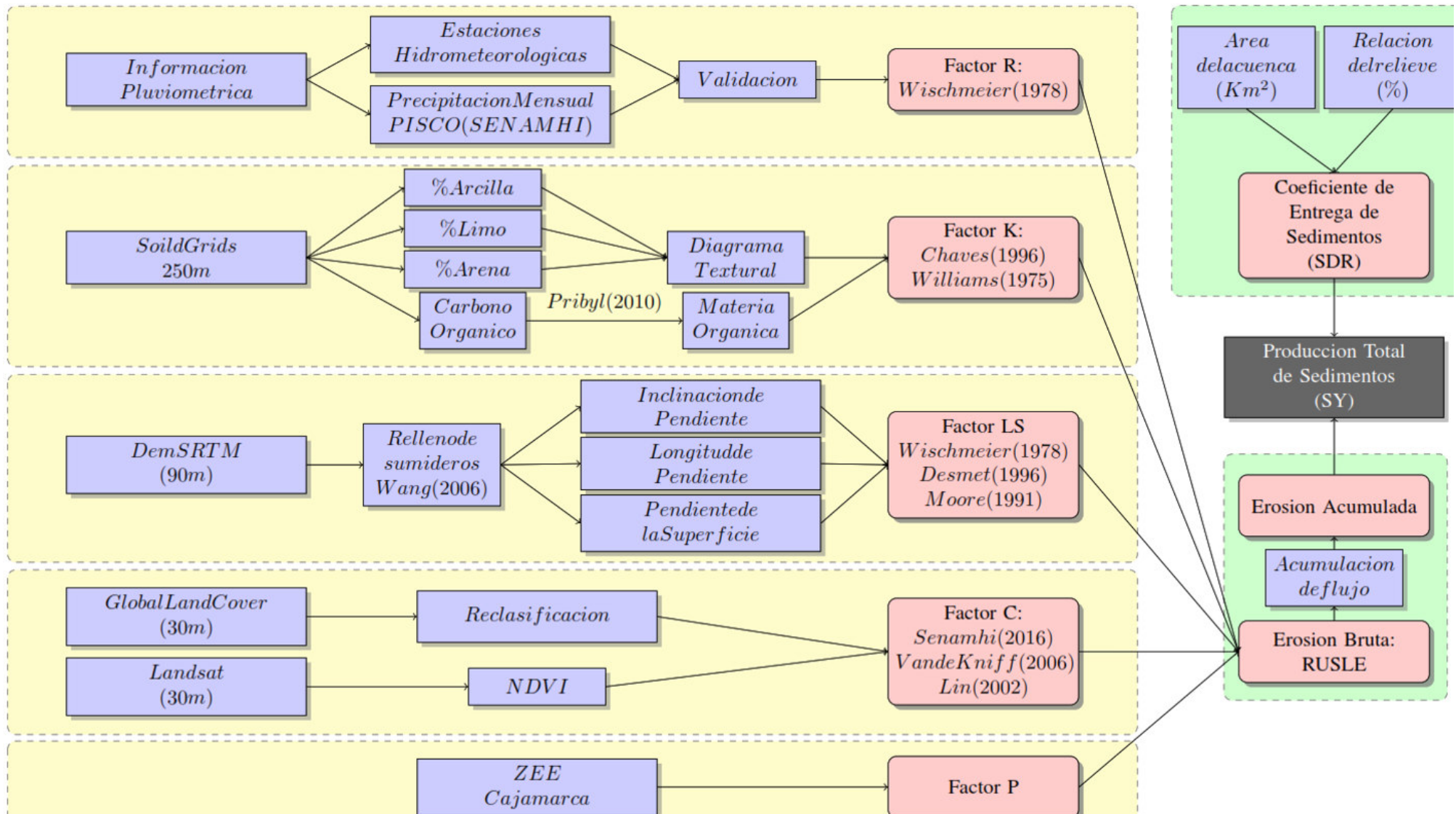


Figura 38: Diagrama de flujo de la metodología empleada. Elaboración propia.

¹ Silva, Paulo Alfonso: "Classificação e Codificação das Bacias Hidrográficas Brasileiras"

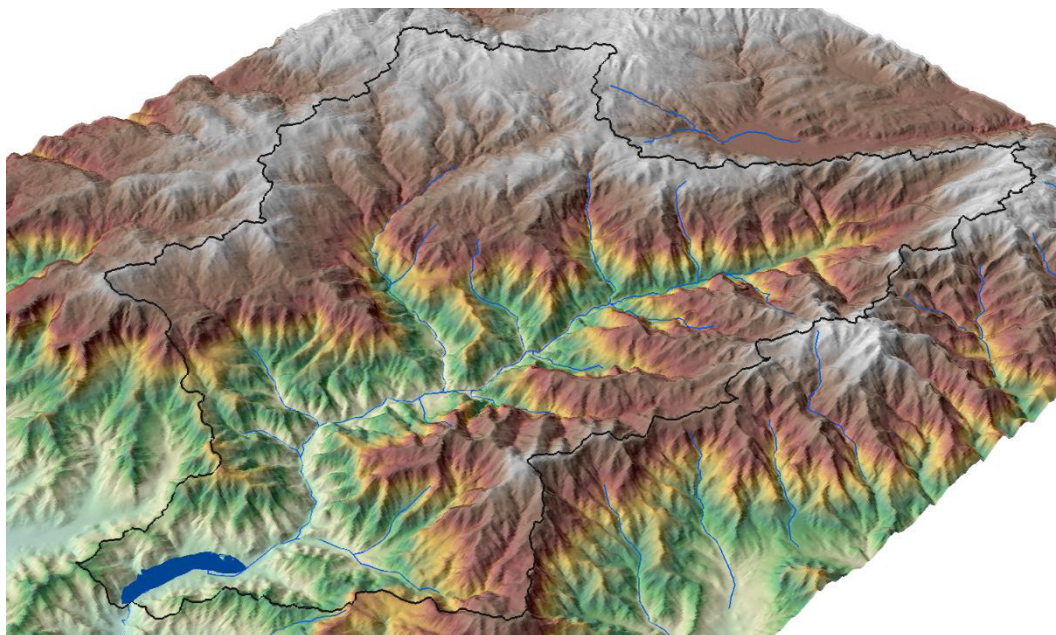


Figura 40: Modelo digital de elevación para el área de estudio. Elaboración propia.

5.2 MODELO RUSLE

Esta metodología, tal como se ha explicado en el capítulo 2.5, combina los efectos de la energía de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), grado y longitud de la pendiente (LS), cobertura de suelo (C) y prácticas de control de erosión (P), para la obtención de las pérdidas de suelo dadas para las diferentes combinaciones de estos factores. El punto de partida de esta ecuación se centra en considerar a las precipitaciones como el principal agente activo de esta erosión superficial.



Figura 41: Muestra del proceso de erosión en parcelas.

5.2.1 FACTOR R

El factor de erosividad de la lluvia, se ha determinado a partir del producto PISCO a escala mensual, para esto se han validado los valores extraídos del producto mencionado en el capítulo 4.2 con información de las estaciones mostradas a continuación, despreciando las demás estaciones por presentar tendencias en las series de tiempo.

Nombre	Tipo de Estación	Coordenadas		
		Longitud	Latitud	Altitud
Augusto Weberbauer	Meteorologica Agricola Principal	78° 30' 0.00"	7° 10' 0.00"	2536
El Espinal	Climatica Ordinaria	79° 11' 12.95	6° 49' 22.92"	408.6
Lives	Pluviometrica	79° 2' 0.00"	7° 5' 0.00"	2000
San Benito	Climatica Ordinaria	78° 56' 0.00"	7° 23' 0.00"	1200
San Juan	Climatica Ordinaria	78° 29' 44.90	7° 17' 26.60"	2353
Talla (Guadalupe)	Climatica Principal	79° 25' 29.80	7° 15' 59.00"	150
Udima	Climatica Ordinaria	79° 5' 29.80"	6° 48' 40.70"	1539

Tabla 16: Estaciones climáticas para la validación del factor R

A este producto se le ha extraído cortando mediante la técnica Crop (Paquete Raster en R) y discretizado a una resolución de 250 m, a partir de una mayor de 5 Km, mediante la técnica Resample. considerando a la precipitación como un parámetro cuya significancia es mínima en un área de pocos kilómetros.

El factor R se ha desarrollado usando la fórmula descrita por Wischmeier & Smith, 1978:

$$R = 1.735 * 10^{(1.5 * \log(Pm^2/Pa) - 0.08188)} \quad (32)$$

Considera una precipitación mensual como dato de entrada y estima este factor para un periodo de un año. Esta ecuación ha sido elegida porque se ajusta a las condiciones de la cuenca de estudio, siendo de gran tamaño y con una pendiente fuerte, además de contar con la información que se requiere, que es la precipitación grillada.

A partir de la información recopilada de la precipitación del producto PISCO (Capítulo 4.3), se han realizado mosaicos del área de trabajo de la investigación y almacenado en

formato netcdf (*.nc) que es aplicado generalmente para trabajar con series de tiempo de productos de tipo raster.

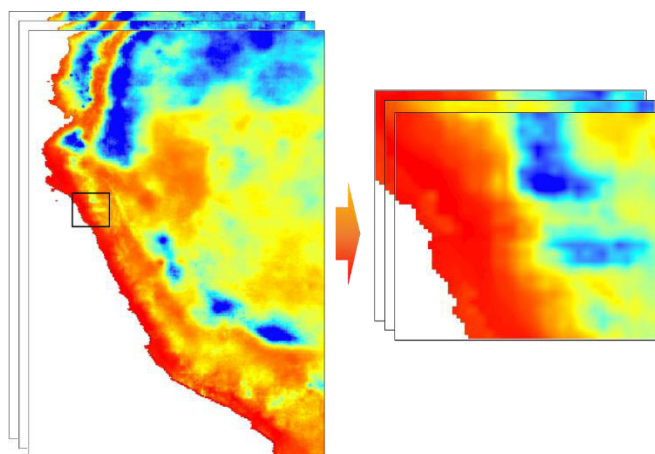


Figura 42: Recorte del producto PISCO

A continuación, se muestran los resultados del factor R para algunos años, además considerando el año 1998, con ocurrencia de fenómeno El Niño, mostrando unos valores mayores que el resto de años. Para este año, se ha evaluado de la misma manera, pero el factor se ha calculado para cada mes, obteniendo valores que hacen ver la gravedad de la precipitación en los meses que duraron los efectos del fenómeno El Niño.

Los resultados tienen las unidades de MJ*mm/ha*año, y nos da a entender la cantidad de energía que se produce por milímetro de precipitación sobre una hectárea de superficie a lo largo de un año.

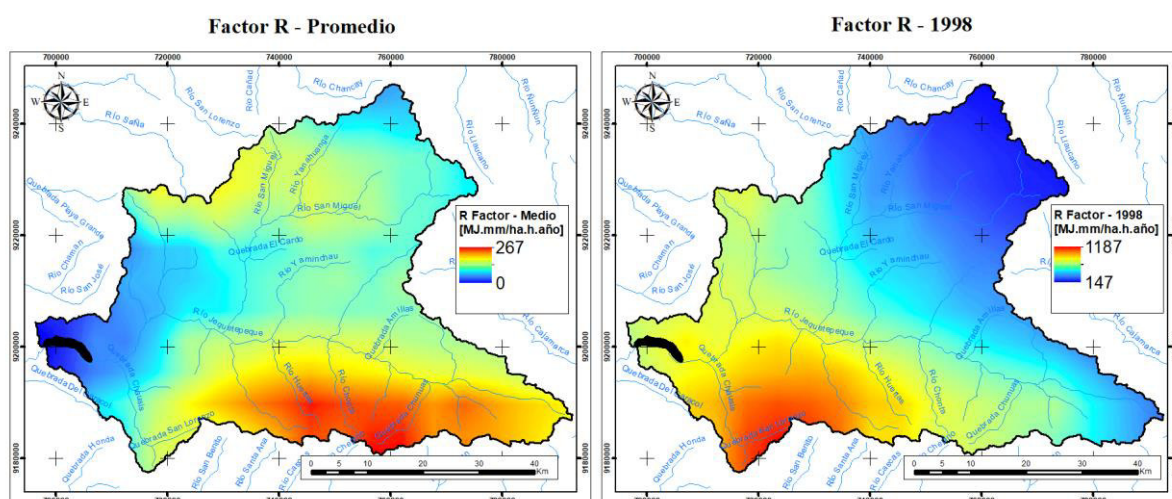


Figura 43: Distribución espacial del Factor R promedio y en año con fenómeno El Niño

Morera, en el boletín técnico N° 7 del IGP (2014), señala que el transporte de flujos sólidos son una respuesta inmediata a la escorrentía en picos de descarga; esto indica

que, si la precipitación supera un umbral promedio, por consecuencia producirá mayor escorrentía y la erosión será mayor. Además, también hace una interpretación de la producción de sedimentos en años normales como la contribución de eventos El Niño en la producción de erosión, pudiendo llegar a cambiar la tasa de erosión anual promedio, hasta unas 60 veces más.

En referencia al párrafo anterior, se ha hallado el factor R para cada mes del año 1998, año en que se evidenció un evento El Niño de grandes magnitudes, comparado con años normales, superando los valores de 1000 MJ*mm/ha*h.

A continuación, se muestra un gráfico tipo boxplot indicando los cuartiles que presenta el factor R para cada mes del año, correspondiendo una notoria respuesta de erosión durante los meses húmedos. Cabe resaltar que, al tratarse de una escala mensual, aún existe una subestimación a la energía cinética de la lluvia sobre la superficie que puede producirse en una tormenta.

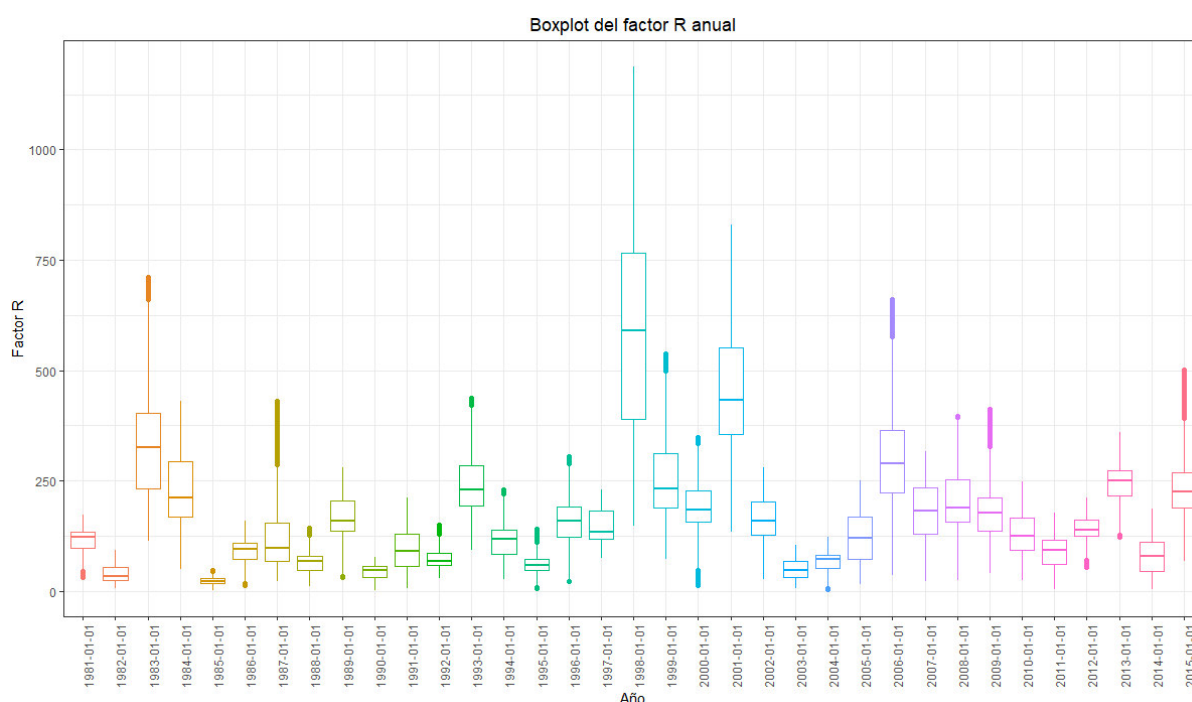


Figura 44: Boxplot del factor R para cada año

De la figura 39 se deduce que la erosividad de la superficie aumenta a una escala mucho mayor que el comportamiento de la precipitación, entendiendo que una mayor erosión es producida cuando se supera un umbral de precipitación y esta se nota en el año 1998 que hubo Fenómeno El Niño.

5.2.2 FACTOR K

El factor de erodabilidad del suelo mide la susceptibilidad a la erosión, a partir de características intrínsecas de este. En un principio, su valor se determina a partir de un nomograma desarrollado por Wischmeier y Smith.

Los parámetros físicos significativos en la erosionabilidad de los suelos son:

- Textura
- Materia orgánica
- Estructura
- Permeabilidad

Los suelos más erosionables corresponden a texturas intermedias (fracción de limos más abundante), y que los suelos con un porcentaje de arcillas superior al 30% son poco erosionables (Gonzales del Tánago, 1991).

Las ecuaciones descritas en el capítulo 2.5.2 consideran la mayoría de estos parámetros, sin embargo, se ha optado por utilizar las ecuaciones de Chavez y Williams, que hacen aproximaciones sin considerar la estructura y permeabilidad, parámetros bastante complejos de obtener información.

Para estas ecuaciones se han utilizado los parámetros mostrados, en los que se relaciona el tamaño de las partículas del suelo y la cantidad de materia orgánica, según (Pribyl, 2010), conteniendo el 58% de carbono orgánico.

Chaves (1996):

$$K = \frac{0.00043(AF + SIL)}{CO} + 0.000437 * AR + 0.000863 * SIL$$

Williams (1975):

$$K = \left[0.2 + 0.3 * \exp \left(-0.0256 * SAN * \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right) \right] * \left[1 - \frac{0.25 * CLA}{CLA + \exp(3.72 - 2.95 * CLA)} \right]$$

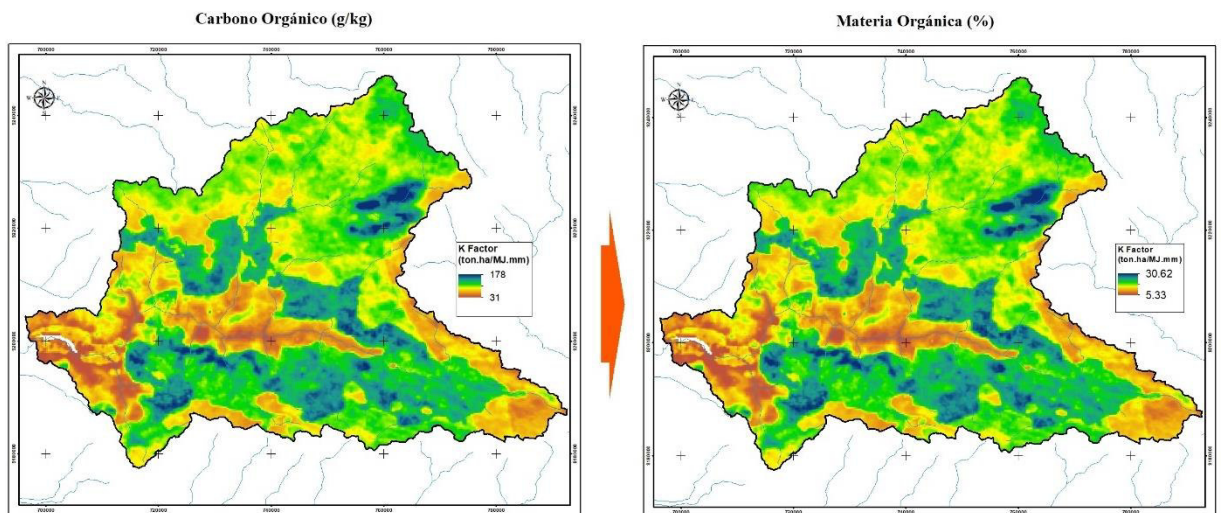


Figura 45: Porcentaje de materia orgánica

Con estos datos, se aplican las fórmulas mencionadas considerando que todos estos parámetros cuentan con el mismo sistema de referencia y la misma resolución espacial (250 m).

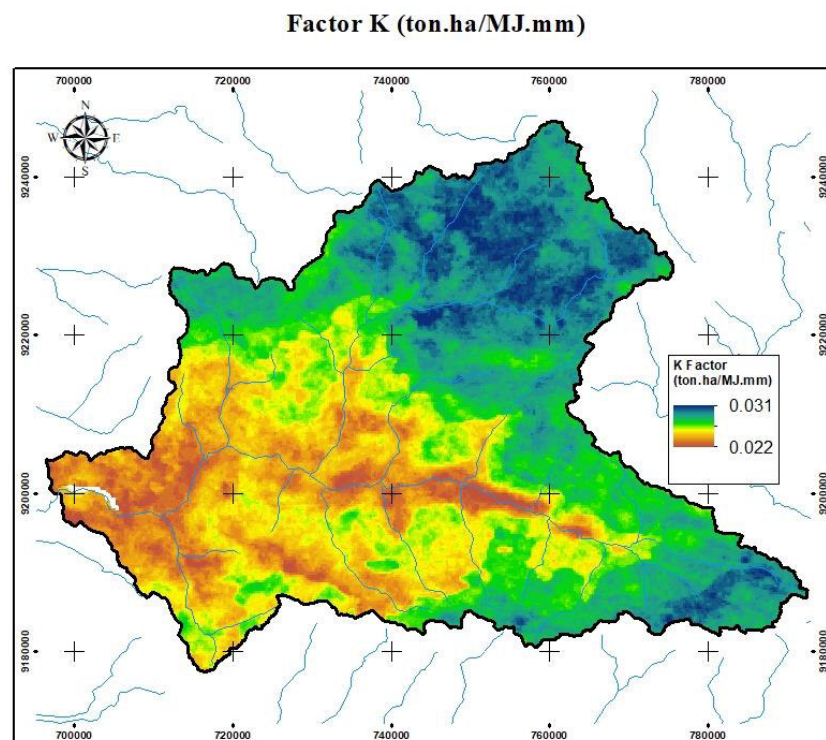


Figura 46: Factor K para el área de estudio

El factor K, adaptado al sistema métrico, generalmente presenta valores entre 0.01 y 0.06, y tal como se observa, según los grados mostrados en la tabla 5, la erodabilidad del suelo en la cuenca de estudio se encuentra en un rango de 0.022 a 0.031, yendo de moderado a fuerte y entendiendo que los suelos de las partes altas de la cuenca son más

susceptibles a ser degradadas por acción de la precipitación que la cuenca media y baja, que presentan una susceptibilidad moderada.

Limitación de grados	Factor K: Erodabilidad (Ton.h/MJ.mm)
0: Nulo	≤ 0.010
1: Ligero	$0.010 \leq K \leq 0.020$
2: Moderado	$0.020 \leq K \leq 0.030$
3: Fuerte	$0.030 \leq K \leq 0.040$
4: Muy Fuerte	$K \geq 0.040$

5.2.3 FACTOR LS

El factor topográfico está estrechamente relacionado al tamaño de celda del modelo digital de elevación (MDE), principalmente por la variación de las pendientes generadas a partir de diferentes resoluciones del MDE, esto es de importancia para todos los modelos hidrológicos distribuidos (Vega, 2017).

Este factor influencia las tasas de erosión en el suelo, aunque en las zonas altas, donde la pendiente es mayor no hay una ocurrencia de fenómenos erosivos como sí se dan en la parte media de la cuenca y la sedimentación se produce principalmente en la parte baja, donde disminuye la pendiente.

Las metodologías para el cálculo de este factor, definidas en el capítulo 2.5.3 consideran el factor longitud y el factor pendiente. El factor longitud depende de la resolución de la imagen. Un paso previo a la aplicación de las fórmulas es la corrección de la topografía mediante la técnica Relleno de sumideros, que uniformiza el MDE, evitando que aparezcan depresiones irrazonables.

La pendiente se calcula con ayuda de la función Terrain del paquete Raster en R, y al tener resultados en grados sexagesimales se multiplica por el coeficiente 0.01745 para transformarlo a pendiente en porcentajes.

Las ecuaciones realizadas para el cálculo del factor LS, son apoyadas con el software SAGA GIS, aplicando las metodologías de Desmet, Moore y Wischmeier.

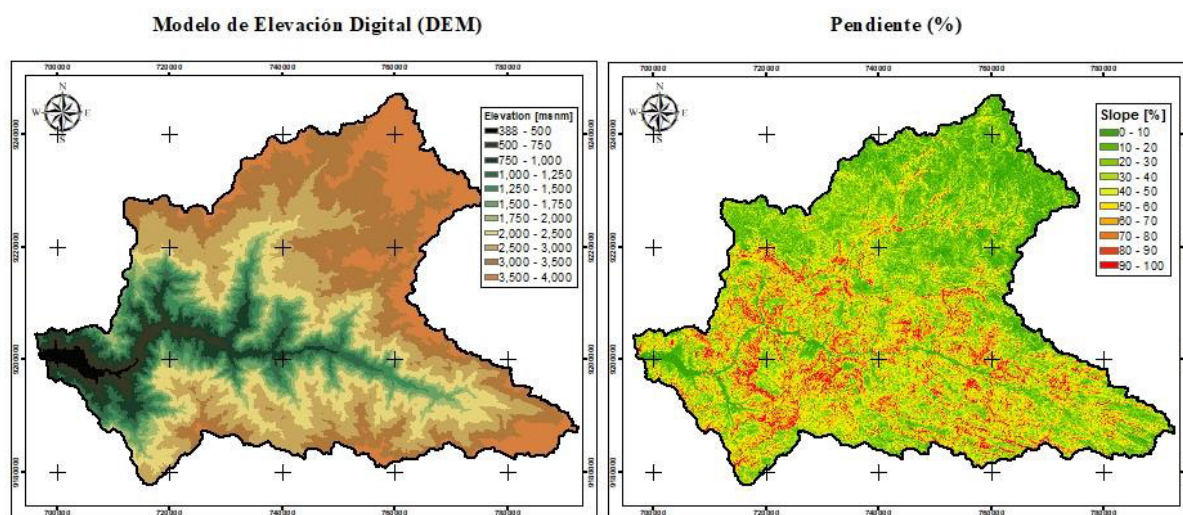


Figura 47: Mapa de Pendientes del área de estudio

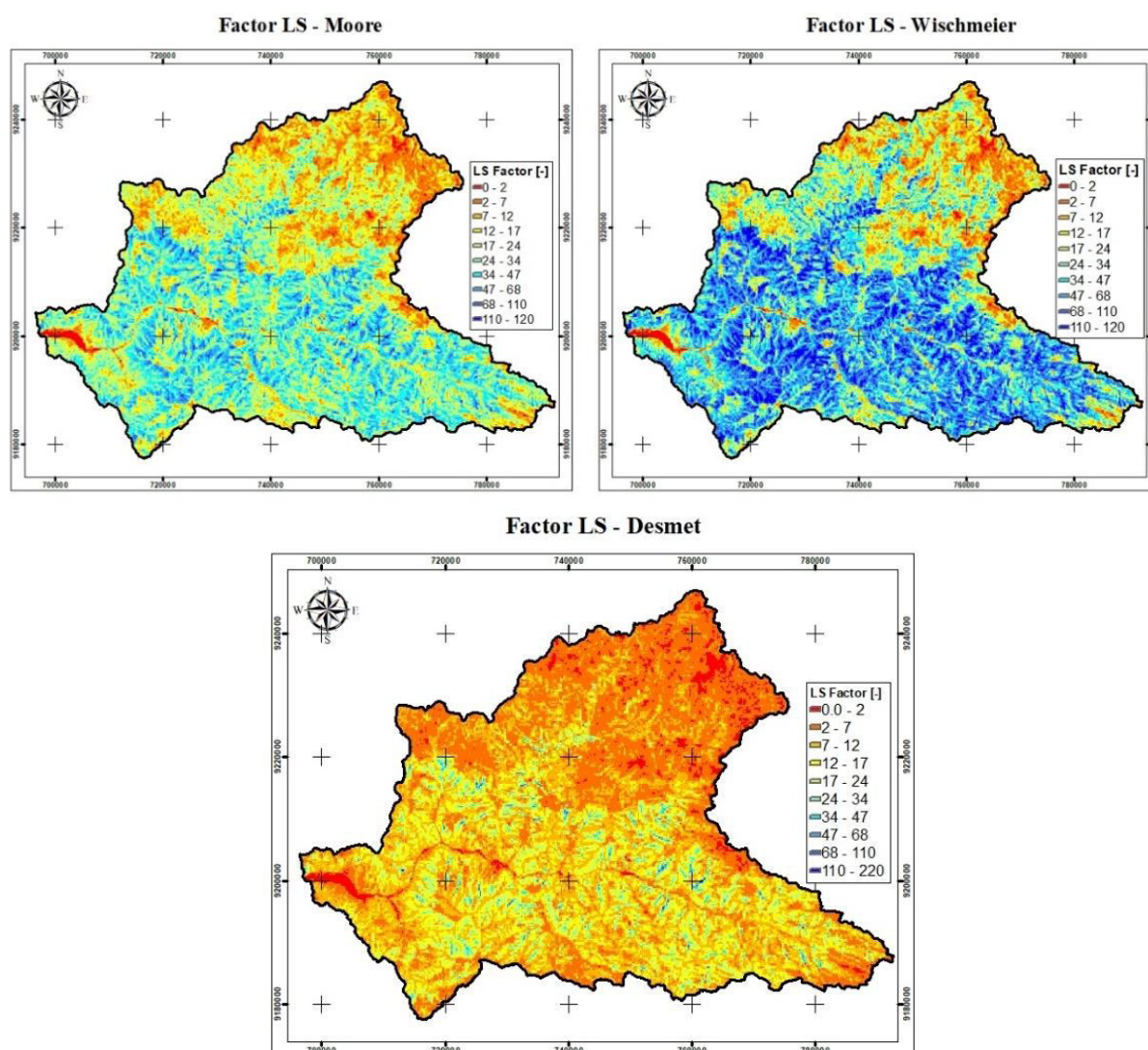


Figura 48: Factor LS para cada una de las 3 metodologías utilizadas

Para el caso de este factor, se han hallado bajo las tres metodologías mencionadas teniendo gran variación de sus valores, pese a la utilización de los mismos parámetros de entrada.

Metodología	Min	Max	Media	Desv. Estandar
LS_Moore	0	77.67	4.55	20.5
LS_Desmet	0.03	191.1	1.96	18.54
LS_Wischmeier	0.07	303.92	8.45	55.36

Tabla 17: Comparación estadística de metodologías para el factor LS

5.2.4 FACTOR C

El factor de Cobertura Vegetal explica la respuesta de la vegetación ante la fuerza erosiva de la precipitación, controlando tanto la energía con la que las gotas de la lluvia impactan en la superficie, como la velocidad de la escorrentía superficial (Gonzáles del Tánago, 1991).

La cobertura vegetal no es perenne, y está sujeta a modificaciones periódicas que dependen del ciclo fenológico de las plantas. Por lo tanto, lo ideal sería hallar este factor para cada mes o en su defecto dos veces al año correspondiendo a los meses de avenida y estiaje.

La complejidad para hallar este factor, depende del acceso a la información; principalmente si se realizara a nivel mensual.

Basándonos en “Estudio Especializado de Cobertura y Uso de la Tierra en la región Cajamarca” elaborado por la Gerencia Regional de Planeamiento, Presupuesto y Acondicionamiento Territorial – GRPPAT del Gobierno Regional de Cajamarca, se ha concluido que la variación de la cubierta vegetal entre el año 2000 y 2013 no ha habido cambios significativos que a una escala regional modifique el comportamiento erosivo.

Este factor ha sido hallado de parte de las siguientes cuatro metodologías. La primera metodología, propuesta por Sabino (2016), utilizado las imágenes del producto GlobalLandCover para el cálculo de este factor, otorgando un único valor a cada unidad de este factor, indistinta en el tiempo y sencillo de aplicar haciendo una reclasificación a los valores según la tabla 18.

Código	Tipo	Contenido	Factor C
10	Tierra Cultivada	Tierras utilizadas para la agricultura, horticultura y jardines	0.63
20	Bosque	Tierras cubiertas de árboles, con cubierta vegetal de más de 30%	0.003
30	Pradera	Terrenos cubiertos de césped natural con cubierta de más de 10%	0.09
40	Matorral	Tierras cubiertas de arbustos con una cubierta de más de 30%	0.22
50	Humedal	Tierras cubiertas de plantas de humedales y cuerpos de agua	0
60	Cuerpos de agua	Masas de agua en la superficie terrestre	0
70	Tundra	Hierbas y arbustos en las regiones polares	-
80	Superficies artificiales	Tierras modificadas por las actividades humanas	0.09
90	Tierra desolada	Tierras con cubierta vegetal inferior a 10%	0.5
100	Nieve y hielo permanente	Tierras cubiertas por la nieve permanente y la capa de hielo	0

Tabla 19: Valores del factor C para producto GLC30. (Sabino, 2016)

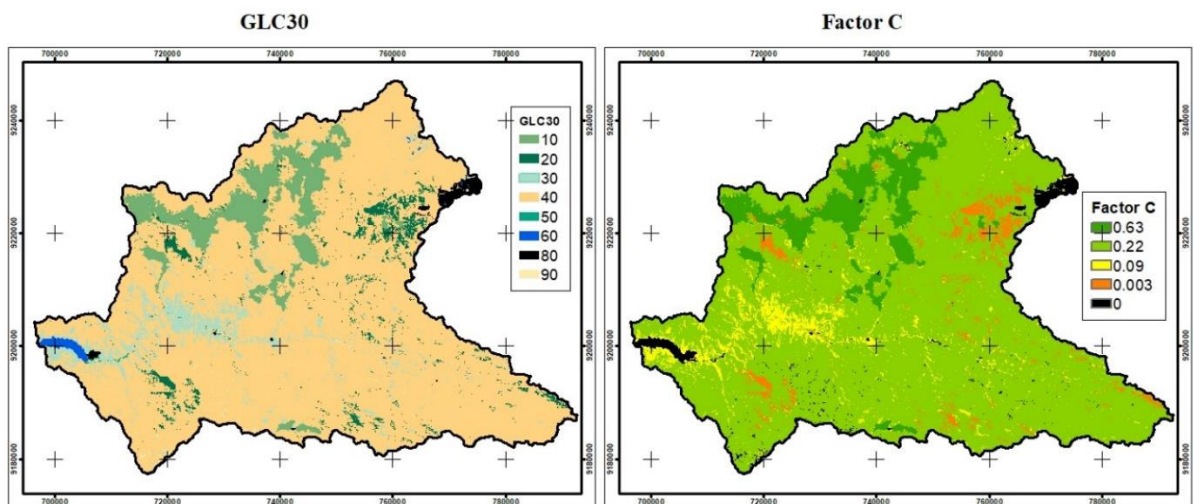


Figura 49: Factor C a partir del producto GLC30. Elaboración Propia

La segunda metodología aplicada ha sido desarrollada por Van de Kniff (1999), utiliza el factor Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como parte de la ecuación mostrada en el capítulo 2.5.3 y siguiendo recomendaciones bibliográficas donde se usaron los coeficientes α y β como 2 y 1 respectivamente.

Sin embargo, esta ecuación está adaptada para regiones europeas, mas no para climas tropicales como el nuestro.

La tercera metodología, desarrollada por De Jong (1994) fue aplicada para estudios de degradación de tierras en regiones mediterráneas, sin embargo, se adapta mejor al resultado al modelo para estimar la sedimentación.

La cuarta metodología fue la desarrollada por Lin (2002), que es una adaptación a la ecuación de Van de Kniff, y se acondiciona a climas tropicales.

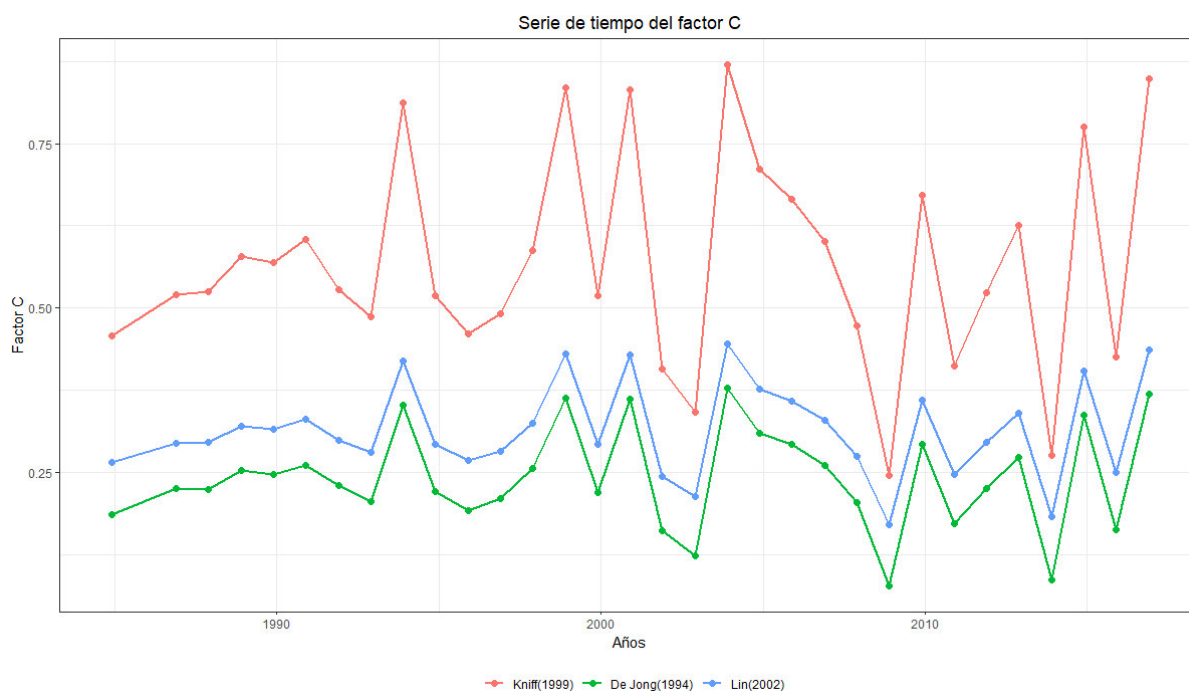


Figura 50: Comparación de las series de tiempo del factor C promedio. Elaboración propia

El NDVI tiene un comportamiento sensible a la variación de la cobertura de suelo, por esto se ha tomado la serie de tiempo de este producto a partir de imágenes Landsat y se han aplicado las diferentes ecuaciones mencionadas, obteniendo la figura 47 que muestra la diferencia que genera al factor C, según la metodología aplicada, donde se explica que el valor de NDVI será inversamente proporcional el factor C, debido a que, a mayor cobertura, menor impacto de la precipitación sobre la superficie.

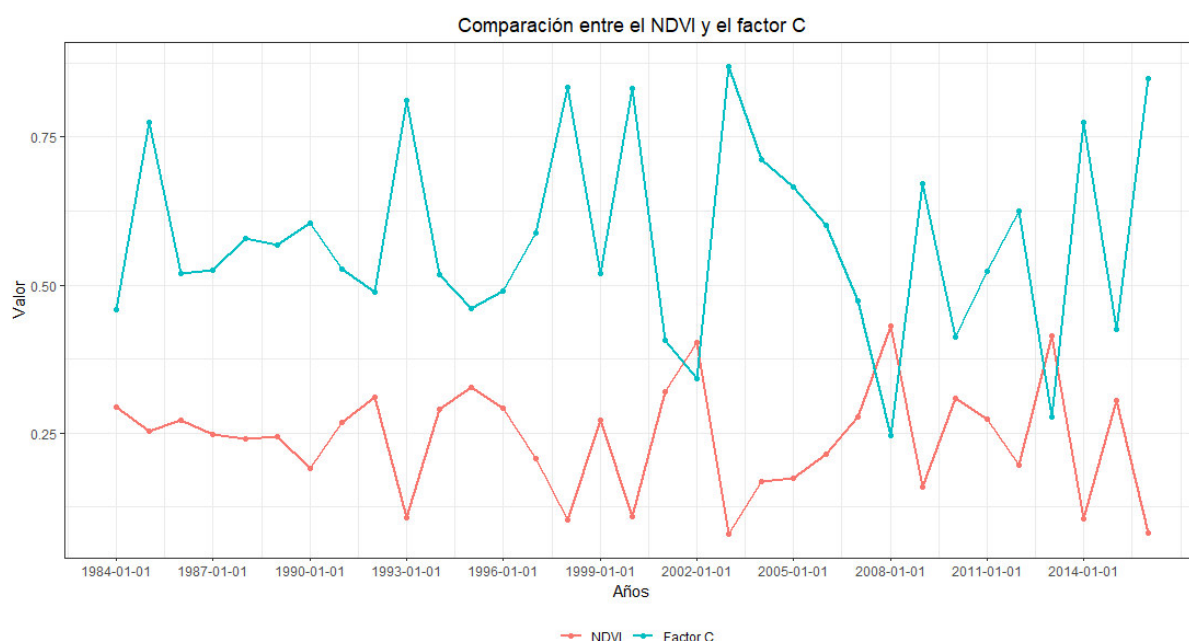


Figura 51: Comparación de la series de tiempo del NDVI con el factor C. Elaboración propia

5.2.5 FACTOR P

El factor de prácticas de conservación de suelos es entendido como la proporción de pérdida de suelo en pendientes con una práctica de apoyo artificial tales como terrazas, surcos en contorno, cultivos en fajas, etc.

Cuanto menor sea el valor de P, más efectiva será la práctica de conservación. Por lo tanto, en la reducción de la erosión del suelo, las prácticas de conservación del suelo no pueden ser detectadas a escala regional y el efecto de las prácticas de conservación de suelos utilizadas en la cuenca, descritos en la Zonificación Ecológica Económica de la región de Cajamarca (2014), muestran una mínima acción humana para contrarrestar los efectos de la erosión hídrica. Con lo mencionado, la ecuación RUSLE se ejecutó con un factor P de 1, reflejando el deseo de predecir la erosión potencial bajo las condiciones actuales de ninguna práctica estructural de conservación de suelos.

Este factor también ha sido considerado con el valor de 1 en estudios con condiciones similares al área de estudio de la presente investigación, pudiendo citar a Yue (2015) o Panagos (2015), donde se aprecia que el valor promedio del factor P para el área de estudio en ambos casos es mayor a 1 y 0.97 respectivamente, lo que lo hace prácticamente irrelevante para la aplicación de esta investigación.

5.2.6 RUSLE

El proceso del producto de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos requiere que todos sus factores tengan las mismas características espaciales, un proceso complejo debido a las distintas fuentes de datos, requiriendo trabajar con información a diferentes escalas, por lo que se ha empleado métodos de remuestreo (resample, en inglés), regrillado y reproyección de sus sistemas de coordenadas, uniformizando una resolución de 250 m para todos los factores.

Al tener todos los factores como constantes, a excepción de la erosividad de la lluvia, se ha generado un producto por año, siendo desde 1981 al 2015 para calcular la acumulación anual de sedimentos. Entonces se tiene una serie de 34 años. Sin embargo, el inicio de operaciones de la presa empieza en 1988.

$$A = R * K * LS * C * P$$

Los resultados se pueden ver en los anexos.

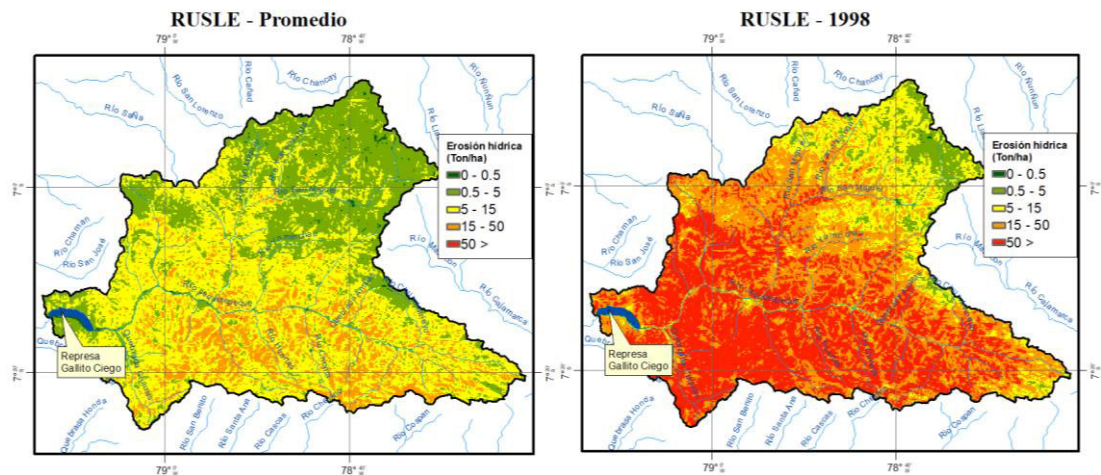


Figura 52: Producto de erosión por la metodología RUSLE promedio (Izquierda) y año 1998 (Derecha).
Elaboración propia

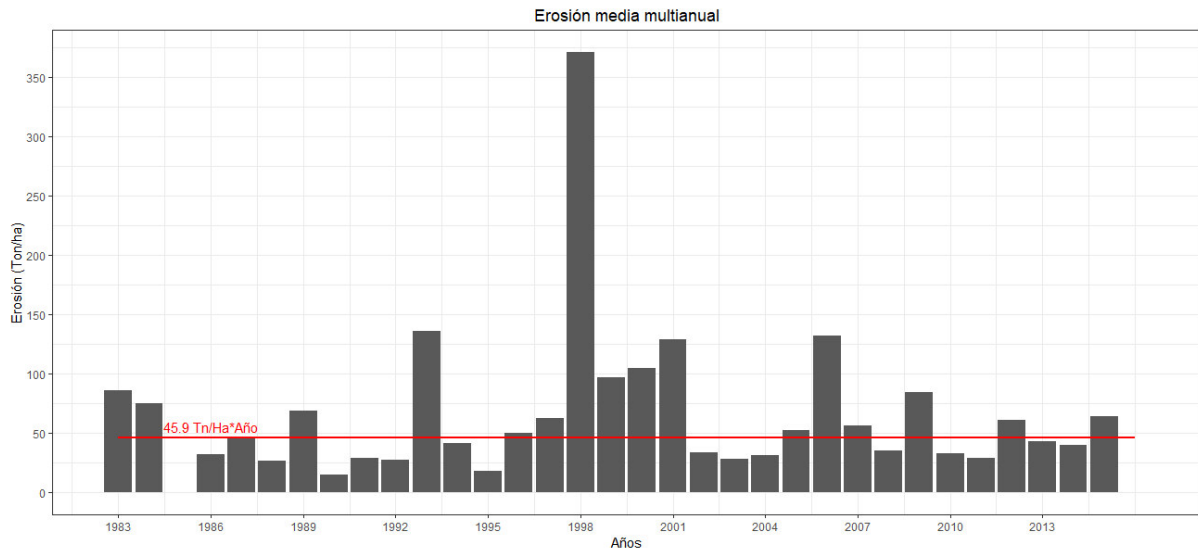


Figura 53: Gráfico de barras de la erosión anual promedio en el área de estudio. Elaboración propia.

5.3 PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

La producción general de sedimentos está dada por el producto de la erosión bruta con el factor SDR, que es la proporción entre la erosión que llega y escurre hasta llegar a la desembocadura. Como se explicó, técnicamente esto requiere de procesos complicados que envuelven ecuaciones físicas de dinámica de fluidos y morfología de ríos. Este factor es una adaptación empírica, probada en numerosas cuencas y encontrando una relación coherente entre el área o la pendiente de la cuenca y la producción de sedimentos.

En esta investigación, se han utilizado las ecuaciones mencionadas en el capítulo 2.6 utilizando la elevación y la pendiente del terreno como base para la producción de sedimentos. Estas ecuaciones han sido aplicadas a cada subcuenca del área de estudio, extrayendo su elevación y pendiente media.

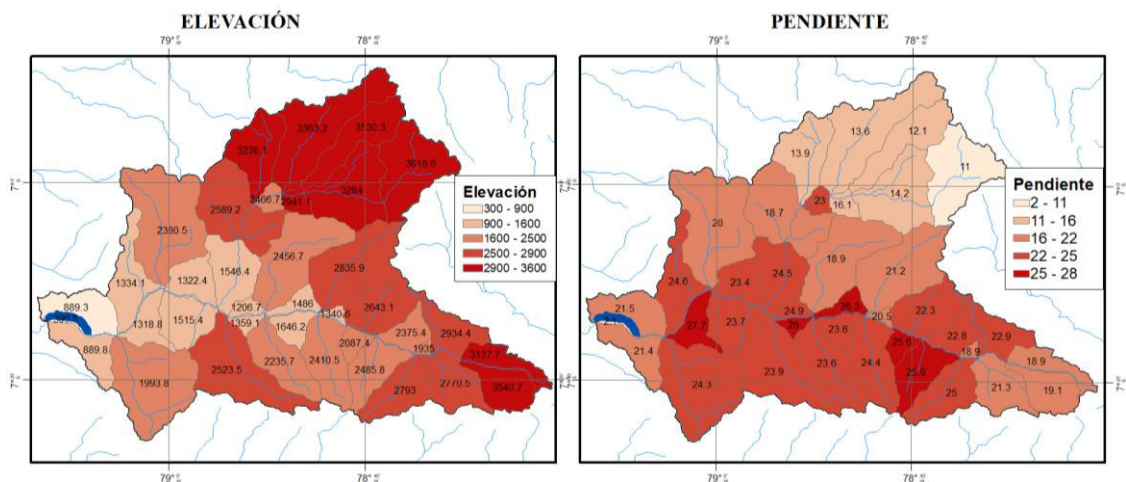


Figura 54: Parámetros de elevación y pendiente para cálculo de factor SDR

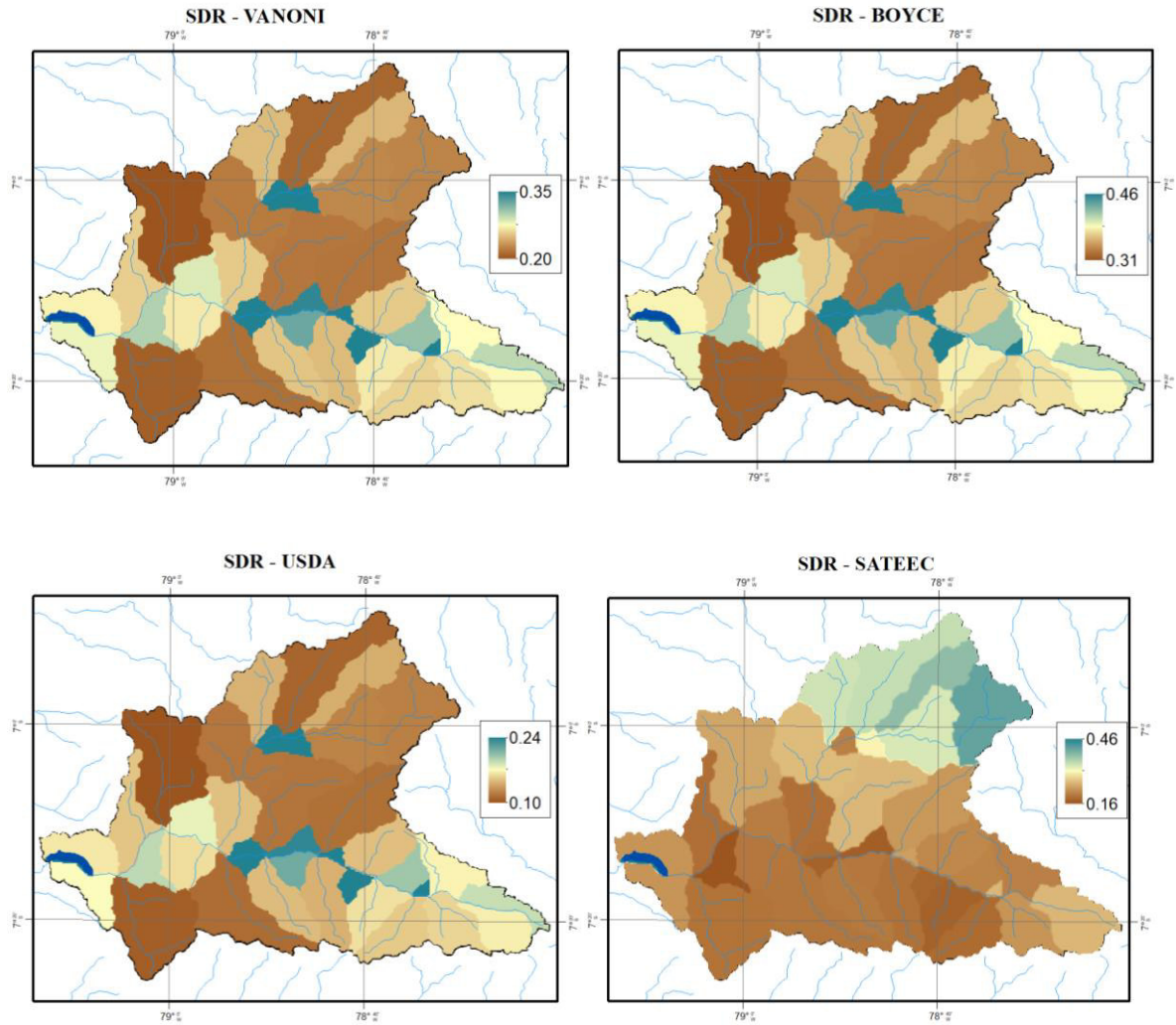


Figura 55: Producto SDR para cada ecuación a nivel de subcuena.

Finalmente, la producción de sedimentos viene a ser el producto de la erosión bruta o a partir de la ecuación RUSLE y el coeficiente de aporte de sedimento SDR; esto se hace para cada año del que se tenga registro, así que la producción de sedimentos (SY por sus siglas en inglés: Sediment Yield) viene a ser la cantidad de sedimentos por pixel en el área de la cuenca. Por lo tanto, la producción de sedimentos para una desembocadura o un “corte” como una presa, viene a ser la acumulación de sedimentos en su área de captación.

Este proceso ha sido realizado en varias iteraciones, que pueden ser replicadas aplicando el código adjunto en los anexos, buscando la mejor respuesta por parte de las diferentes fórmulas mencionadas en el capítulo 2.6 utilizadas para el cálculo de cada factor.

5.4 VOLUMEN MUERTO

El cálculo del volumen muerto en presas, requiere la acumulación de sedimentos en un punto; para esto se ha hallado la suma de la producción de sedimentos para cada año, que viene a ser el producto de la erosión bruta calculada por la ecuación RUSLE y el coeficiente de aporte de sedimentos (SDR). Este proceso entrega como resultado la producción neta de sedimentos (SY). La sumatoria de la producción neta de sedimentos a lo largo de la cuenca viene a ser la producción sedimentaria en el punto de desembocadura de la cuenca, que en esta investigación viene a ser el reservorio Gallito Ciego.

Teniendo la producción neta de sedimentos en el reservorio en valores de toneladas, debe calcularse el volumen que represente este peso.

El cálculo del volumen del material sedimentario, viene a ser el producto del peso sumergido (SY acumulado) con el peso específico del material en condiciones húmedas, que según Weber (2000), toma el valor de 1.65 Ton/m³, que expresan que cada metro cúbico de material sumergido, tiene un peso de 1.65 toneladas. Según las ecuaciones 29 y 30, se puede deducir lo siguiente:

$$V_s * A * \frac{1}{\delta_s} = V_{muerto}$$

Donde:

V _s	: Aporte Sólido Total (Ton/km ²)
A	: Área de cuenca (km ²)
W	: Peso sólido total (Ton)
δ _s	: Peso Específico Sumergido (Ton/m ³)
V _{muerto}	: Volumen Muerto (m ³)

O lo mismo, que se representa de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Producción de sedimentos acumulado (Ton)}}{\text{Peso específico de material sumergido (Ton/m}^3\text{)}} = \text{Volumen muerto (m}^3\text{)}$$

Dado que las magnitudes de resultados que se manejan son elevadas, se maneja en unidades de Millones de Metros Cúbicos (MMC), para lo cual se divide el resultado sobre 10⁶.

Esta metodología ha sido utilizada para las diferentes ecuaciones planteadas, haciendo un análisis de sensibilidad y deduciendo un resultado que tenga mayor coeficiente de correlación con respecto a los datos observados.

La información climática con la que se cuenta, es a partir del año 1981, el inicio de operaciones del Proyecto Especial Jequetepeque Zaña (PEJEZA) es a partir del año 1988, además de tener un *outline* importante en el año 1998 producto del fenómeno El Niño.

AÑO	Calculado	OBS.
1981	0.0	
1982	0.0	
1983	0.1	
1984	4.1	
1985	0.0	
1986	1.8	
1987	2.5	
1988	1.5	Inicio operaciones PEJEZA
1989	3.8	
1990	0.9	
1991	1.6	
1992	1.5	
1993	7.5	
1994	2.3	
1995	1.0	
1996	2.8	
1997	3.4	
1998	20.2	Fen. El Niño
1999	5.3	
2000	5.9	
2001	7.0	
2002	1.8	
2003	1.6	
2004	1.8	
2005	3.0	
2006	7.2	
2007	3.1	
2008	1.9	
2009	4.7	
2010	1.9	
2011	1.6	
2012	3.4	
2013	2.4	
2014	2.3	
2015	3.6	
Acum. 1988	104.75	Acumulado desde inicio de actividades de la presa

Tabla 20: Comparativa de resultados a partir de diferentes metodologías para el cálculo del factor LS.

Producto de la tabla 20, se estima un volumen muerto acumulado de 104.75 Millones de metros cúbicos (MMC), considerando la sumatoria desde el año 1988.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo se centra en un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior; aquí, el principal propósito es la discusión y comparación con la información oficial recolectada, considerando el contexto geográfico, la calidad de la información trabajada, la metodología y las limitaciones que han sido observadas, garantizando la fiabilidad de resultados.

6.1 ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para analizar la eficiencia entre la producción de sedimentos generados a partir de la metodología de esta investigación con la información batimétrica del reservorio, proporcionado por el Proyecto Especial Jequetepeque - Zaña (PEJEZA), véase tabla 19; se han utilizado modelos matemáticos para aproximar una relación entre ambas variables como la regresión lineal y coeficiente de regresión en el caso de los resultados; mientras que para la correspondencia entre los modelos de la ecuación RUSLE, se ha utilizado una matriz de correlaciones.

AÑO	RESULTADO	PEJEZA	OBSERVACIONES
1988	1.5	0.0	Inicio de operaciones
1989	3.8	0.0	
1990	0.9	6.9	
1991	1.6	3.4	
1992	1.5	3.4	
1993	7.5	3.4	
1994	2.3	1.6	
1995	1	0.0	
1996	2.8	3.2	
1997	3.4	1.6	
1998	20.2	39.0	Fenómeno El Niño
1999	5.3	1.6	
2000	5.9	0.2	
2001	7	2.6	
2002	1.8	2.6	
2003	1.6	2.6	
2004	1.8	2.6	
2005	3	2.6	

2006	7.2	2.6	
2007	3.1	2.0	
2008	1.9	3.5	
2009	4.7	3.5	
2010	1.9	3.5	
2011	1.6	4.0	
2012	3.4	4.0	
2013	2.4	4.0	
2014	2.3	4.2	
2015	3.6	4.2	

Tabla 21: Valores de producción de sedimentos anuales en el reservorio Gallito Ciego. Fuente: PEJEZA.

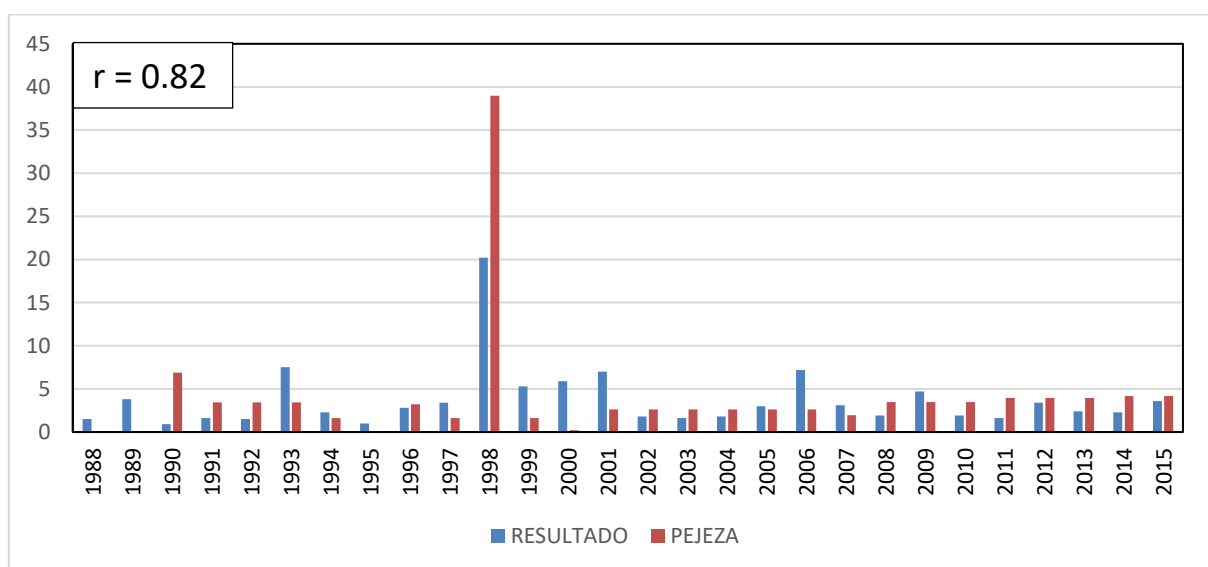


Figura 56: Acumulación de sedimentos por año. Elaboración propia.

De acuerdo a los datos observados, se tiene que la correlación existente entre los dos productos es de 0.82, lo cual indica un comportamiento aceptable; sin embargo, existen algunos años en los que el modelo calculado sobreestima o subestima con relación a los valores recogidos validados con información de campo.

La significancia a nivel anual de la producción de sedimentos es bastante complicada de estimar, debido a que no se cuenta con una batimetría anual del reservorio; por lo que se ha optado por estimar la significancia a una escala acumulada multianual, que representa el volumen muerto que va siendo almacenado cada año en el reservorio, tal como se observa en la figura 50.

AÑO	RUSLE_SDR	PEJEZA	OBSERVACIONES
1988	1.5	0.0	Inicio de operaciones
1989	5.2	0.0	
1990	6.1	6.9	
1991	7.7		
1992	9.2	13.8	
1993	16.7	17.2	
1994	19.0	18.8	
1995	19.9	18.8	
1996	22.7	22.0	
1997	26.1	23.6	
1998	46.4	62.6	Fenómeno El Niño
1999	51.6	64.3	
2000	57.5	64.5	
2001	64.5		
2002	66.3	69.7	
2003	67.9		
2004	69.7	75.0	
2005	72.7		
2006	79.9	80.2	
2007	83.0	82.2	
2008	84.9	85.6	
2009	89.7	89.1	
2010	91.5	92.6	
2011	93.2		
2012	96.6	100.6	
2013	98.9	104.5	
2014	101.2	108.7	
2015	104.7	112.9	

Tabla 22: Volumen acumulado de sedimentos en el reservorio Gallito Ciego.

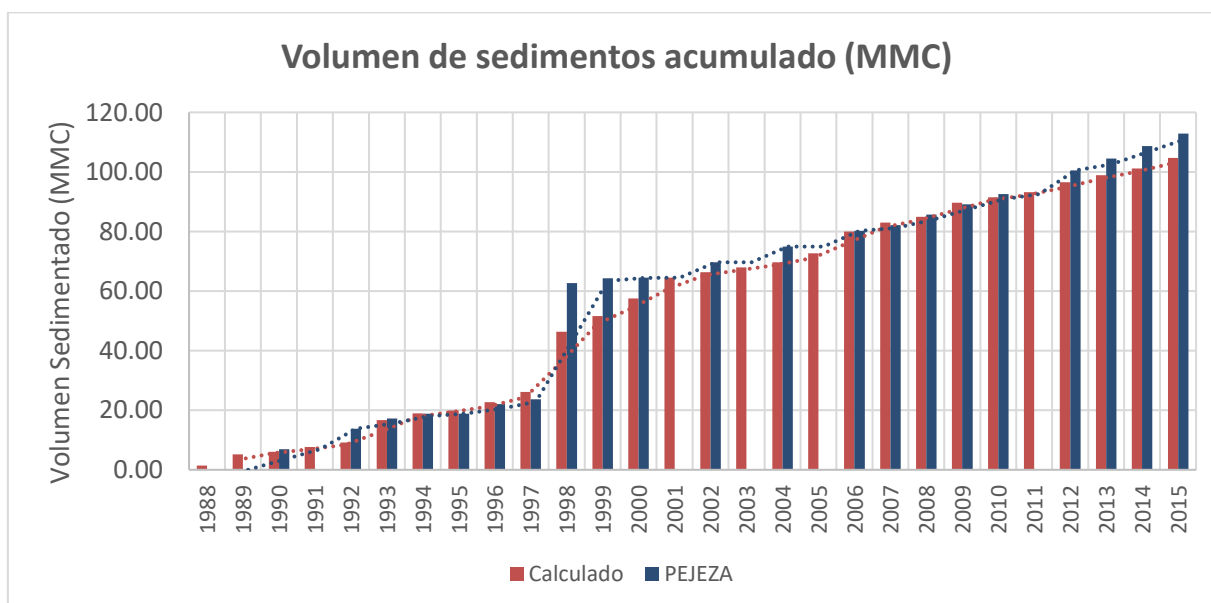


Figura 57: Comparación entre los volúmenes de sedimentos generados y observado

Para determinar estadísticamente si lo que se muestra es correcto se ha realizado una gráfica de regresión lineal entre el volumen acumulado por la metodología propuesta y la información proporcionada por PEJEZA, obteniéndose un coeficiente de correlación¹ de 0.992 y representado en la figura 51:

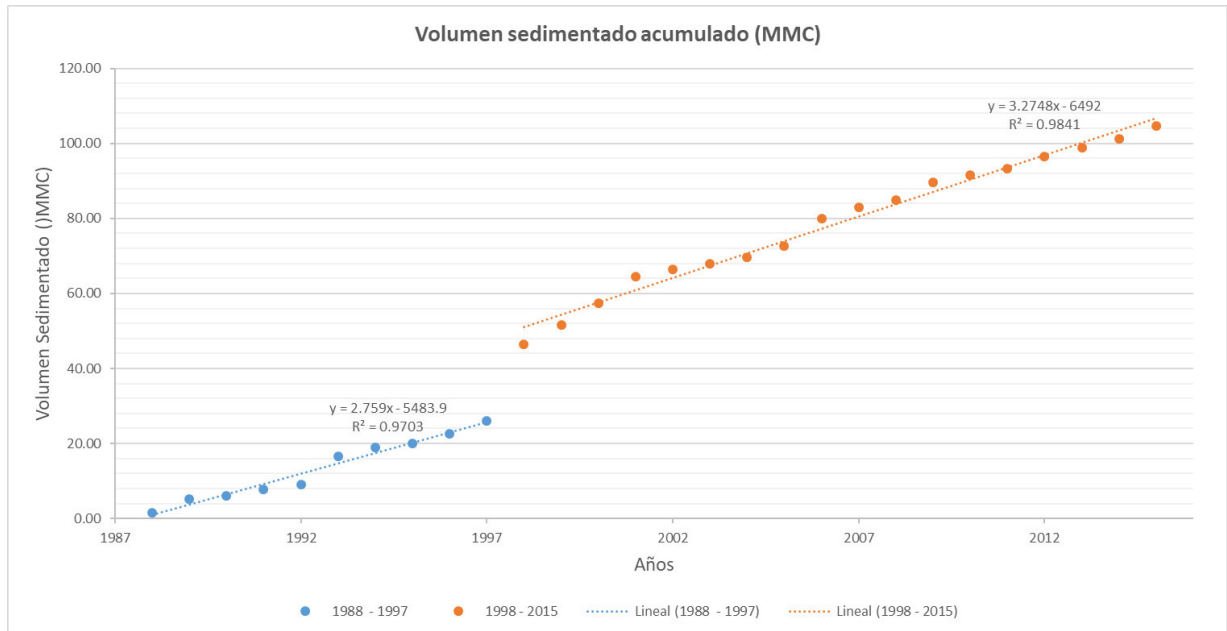


Figura 58: Línea de tendencia del producto calculado

Para estimar el tiempo de vida, se han hallado dos ecuaciones de regresión lineal comparando el volumen muerto a través de los años; el cual permite evaluar cuánto tiempo de vida le queda al reservorio.

$$y = 2.759x - 5483.9$$

$$y = 3.2748x - 6492$$

Finalmente, el tiempo de vida de colmatación de un reservorio puede ser estimado de acuerdo al volumen con el que se ha diseñado. Tal como se vio en el capítulo 3.6.1, el volumen de almacenamiento es de 534 MMC (Millones de metros cúbicos) al inicio de su operación, entonces aplicando la metodología RUSLE.

Con la primera ecuación, la variable y toma el valor de 534, dando como resultado la variable x como 194, que representa la cantidad de años que se demoraría en colmatar el reservorio totalmente desde el inicio de sus operaciones. Sin embargo, el fenómeno no se ha considerado

¹ El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Además de ser independiente de la escala de medida de las variables.

el Fenómeno El Niño, cuyo impacto, dependiendo de la magnitud, puede llegar a sedimentar hasta 40 MMC en un mismo año; lo cual es válido tener en consideración

En promedio, resulta para cada año, el volumen muerto es de 3.27 MMC con una desviación estándar de 3 MMC y que por evento extremo puede llegar a ser hasta de 40 MMC, como lo observado en el fenómeno de El Niño de 1998.

Según recientes investigaciones (Morera, 2014), indican que un evento extremo como el fenómeno de El Niño, las tasas de erosión pueden elevarse hasta incluso 60 veces su promedio y dada la cantidad de información de eventos extremos que han ocurrido estos eventos en la zona de estudio, no es viable estimar la producción de sedimentos en eventos extremos.

6.2 TIEMPO DE VIDA ÚTIL ESTIMADO

Los resultados estimados por la metodología empleada en la presente investigación han sido comparados con los estudios de prefactibilidad y licitación del proyecto de creación de la presa Gallito Ciego, previos a su ejecución y al estudio realizado por la empresa H&O Ingenieros, encargada de realizar los estudios de batimetría del reservorio Gallito Ciego.

	Factibilidad Año 1973	Licitación Año 1975	Estudio H&O Ingenieros 2013	RUSLE_SDR
Sedimento en Suspensión	1.25 MMC/año (71 %)	1.20 MMC/año (71 %)	-	-
Sedimento de Arrastre	0.50 MMC/año (29 %)	0.50 MMC/año (29 %)	-	-
Total Anual	1.75 MMC/año	1.70 MMC/año	4.16 MMC/año	3.9 MMC/año
Volumen útil del reservorio	534 MMC			
Tiempo de Vida	305 años	314 años	128 años	137 años
Volumen muerto actual (2015)	113 MMC			
Tiempo de vida restante (estimada)	241 años	248 años	101 años	108 años

Tabla 23: Tabla de comparación de resultados de producción de sedimentos y estimación del tiempo de vida útil en el reservorio Gallito Ciego. Elaboración propia.

6.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

6.3.1 Limitaciones del Modelo RUSLE:

Los modelos empíricos son generados a partir de experiencias para la explicación de un fenómeno, pasando por pruebas de ensayo y error.

La primera limitante de este tipo de metodologías, es que estas ecuaciones son asociadas a un solo tipo de características geográficas, generalmente donde se realizaron los experimentos y no son validados para otras regiones a menos que se cuente con información documentada de la confirmación de estas metodologías para un lugar nuevo de aplicación, por lo que se debe ser cuidadoso al seleccionar la metodología a utilizar para el desarrollo de cada factor.

En segundo lugar, la escasa información climática y edafológica de nuestro país es bastante limitada en cuanto a espacialización, calidad y cantidad de información, si bien puede contarse con información remota proveniente de los satélites, esta no puede ser usada indiscriminadamente sin la verificación de su data.

En cuanto al factor R, este factor viene a ser la sumatoria de los valores de erosividad, que en un primer momento se ha basado en la intensidad y volumen de la lluvia para un determinado evento, sin embargo, al acondicionarse a la data mensual de precipitación, su aplicación puede llevar a estimaciones exageradas de la erosión si no son consideradas las condiciones de humedad antecedente. Además, según la información de sedimentos en la entrada al reservorio Gallito Ciego proporcionada por el Proyecto Especial Jequetepeque Zaña (PEJEZA) se puede colegir que la producción de sedimentos a partir de la erosión se produce cuando se supera un umbral de precipitación en un lapso de tiempo relativamente corto (horas o días), sin embargo, la metodología empleada en esta investigación requiere de una precipitación mensual, minimizando la erosión generada en días particulares que la lluvia sea de gran magnitud, caso que ocurre en los días del fenómeno El Niño. La solución a este problema, es la identificación de los días en que se genera la mayor cantidad de lluvia y realizar la metodología MUSLE, que analiza la erosión generada por eventos.

En cuanto al factor K, la precisión de este factor dependerá de la información de suelo con la que se cuenta; para esta investigación la información de texturas de suelos y materia orgánica ha sido obtenida a partir del producto SoilGrids, sin ser validada con calicatas por la extensión del área y el costo que supone el realizar esta labor.

Para el factor C, que representa la pérdida de suelo de una superficie sin vegetación, este factor debería ser calculado para cada mes de los años de estudio; sin embargo, la poca

variabilidad de cobertura en un período corto de tiempo y la resolución a la que se ha trabajado a condicionado a usar un solo valor para todos los años del período de estudio. El factor LS, dado el tamaño de la cuenca colectora para el reservorio Gallito Ciego, es bastante variable al aplicar las diversas metodologías. Por lo que se trabajó con tres en particular, yendo en el orden de confiabilidad las ecuaciones de: DESMET > MOORE > WISHCHMEIER, para el área de estudio de la presente investigación.

6.3.2 Limitaciones de los Modelos de Producción de Sedimentos:

El coeficiente SDR no tiene en cuenta las características locales, de precipitaciones, topografía, vegetación, uso del suelo y las características del suelo de la zona de estudio. Existen otras relaciones empíricas que muestran el SDR que varía con diversos atributos fisiográficos, pero tomando en cuenta la limitación de datos de nuestra área de estudio, que tiene una extensión local le da un enfoque globalizado.

Se sabe que hay algunas limitaciones de la utilización de los métodos generales de SDR. Una hipótesis es que los métodos SDR no pueden predecir de forma explícita los lugares y las tasas de deposición de sedimentos en las fases de las tierras bajas, y otro es el problema de la formación de grumos temporal y espacial y la falta de base física. (Wallingford, 1983; Richards, 1993).

El campo de medición de sedimentos es muy limitado dentro de la cuenca alta del río Jequetepeque. Las medidas existentes en esta área son a escalas mucho más pequeñas y en algunos escurrimientos de repente y no se puede confiar para estimar SDR en un dominio espacial. Ante tal limitación, la solución radica en el desarrollo de un modelo de entrega de sedimentos distribuidos espacialmente.

7 IMPACTO

7.1 PROPUESTAS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE LA EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es un tema poco tocado en la ciencia y más aún en nuestro país, recientemente se vienen realizando estudios en instituciones de investigación sin llegar a tener un nexo con las tomas de decisiones, por esto es que no hay una normativa que regularice la producción ni control de sedimentos en los cauces; sin embargo, desde el presente año se ha iniciado la metodología para realizar los planes de descarga, que recogerán el histórico de producción hídrica por reservorio.

El problema de la erosión se amplifica en meses de avenidas, donde el desgaste erosivo de las rocas produce una mayor proporción de sedimentos, afectando tierras agrícolas, cultivos o disminuyendo el tiempo de vida de los embalses.

El problema de la erosión puede ser controlado de distintas formas, desde un punto de vista de la ingeniería:

Técnicas básicas de prevención	Obras de control de sedimentos	Gestión de sedimentos
<ul style="list-style-type: none">-Tapetes de mantillo para mantener la vegetación en laderas.-Muros de contención-Mejora del sistema de drenaje-Evitar que el suelo se compacte-Plantación de árboles-Control de la escorrentía con canales-Realización de terrazas	<ul style="list-style-type: none">-Pozas de Sedimentación-Barreras o pircas de roca-Check dams-Silt fences-Geoweb-Hidrosembras	Debido a que vaciar un embalse no es siempre posible, existen medidas preventivas y correctoras que pueden contribuir a minimizar los procesos de colmatación de embalses.

Tabla 24: Propuestas de solución al proceso de sedimentación. Elaboración propia.

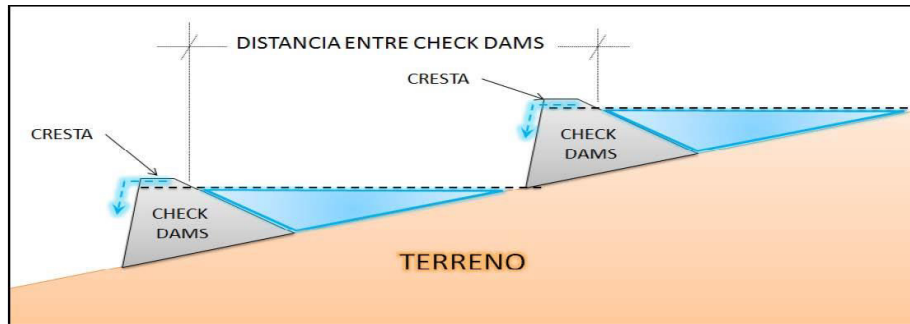


Figura 59: Aplicación de Check Dams para la disminución de la velocidad del cauce.

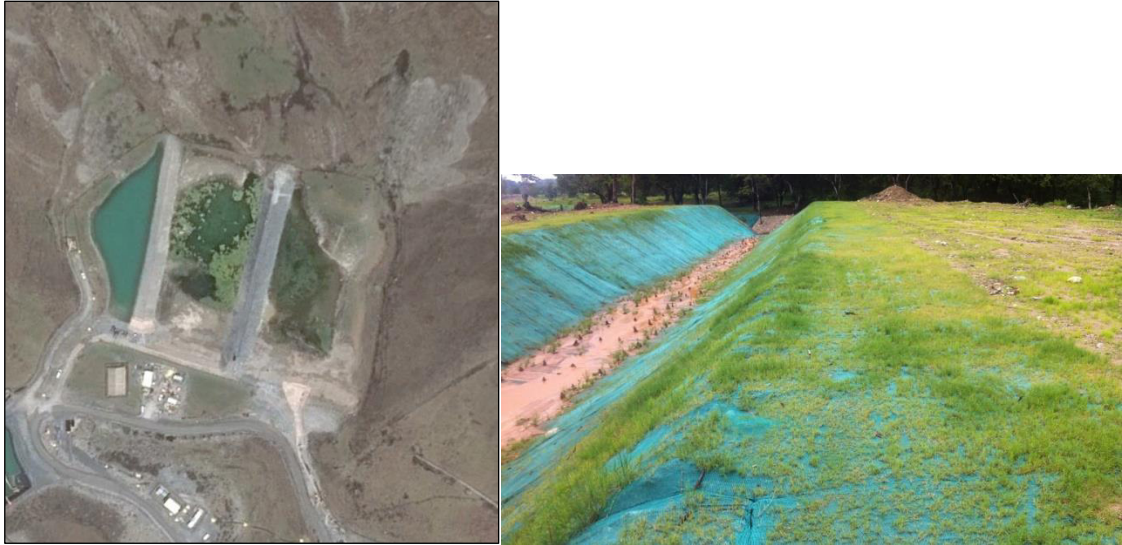


Figura 60: Pozas de sedimentación (Izquierda), Geoweb (Derecha)

8 CONCLUSIONES

La producción de sedimentos es directamente proporcional a la energía cinética producida por la lluvia, así como el tipo de cobertura, que son los principales factores erosivos.

El reservorio Gallito Ciego cuenta con información batimétrica de algunas fechas y además, un registro histórico de sedimentos que son de utilidad para la validación de la metodología; demostrando que el reservorio Gallito Ciego, diseñado para un tiempo de vida de 50 años, hasta el 2013 ha acumulado un volumen de sedimentos de 104.53 MMC, lo cual se ajusta bastante bien a los resultados generados en esta investigación donde se proyecta que hasta el 2015 el volumen muerto acumulado es de 104.75 MMC y que según las proyecciones, el tiempo hasta quedar completamente colmatado es de 128 años desde su inicio de operaciones en 1988.

- **Objetivo Específico N°1:** Si bien son necesarios los cinco factores para la estimación de la erosión hídrica, a una escala regional, se ha considerado que los únicos factores que afectan directamente a la erosión son la Erosividad (Factor R) y la cobertura vegetal (Factor C), en mucha mayor medida la energía producida por la lluvia, quedando los demás factores como valores constantes.
- **Objetivo Específico N°2:** La proporción entre la erosión y la sedimentación depende del área o pendiente de la cuenca aportante, en esta investigación se ha utilizado la ecuación de SDR planteada por Williams, encontrando valores en el rango de 0.16 a 0.46 para las subcuencas del área de estudio.
- **Objetivo Específico N°3:** La producción anual media de sedimentos es de 3.9 MMC de sedimentos con una desviación estándar de 3 MMC, sin considerar los eventos de fenómeno El Niño, en los que puede llegar a perderse 40 MMC, que no puede ser aplicable por la serie de datos evaluados para determinar el factor R.
- **Objetivo Específico N°4:** La identificación de la producción de sedimentos es de utilidad para la toma de decisiones para una correcta gestión del recurso hídrico; la metodología planteada es aplicable a todas las cuencas de la costa norte, donde las ecuaciones se acondicionan a la climatología del área de estudio.

9 RECOMENDACIONES

- La aplicación de la metodología RUSLE requiere una información espacializada validada con información in situ, que al ser limitada aún se cuenta con la ayuda de herramientas remotas, estas no pueden ser usadas indiscriminadamente.
- Los tomadores de decisiones, que son quienes aprueban el desarrollo de las infraestructuras, deben considerar todas las limitantes y hacer campañas de calicatas para la validación de la información textural de suelos.

- Una gran limitante es el acceso a la información por parte de las instituciones públicas; se debe promover el acceso a la información libre para la investigación y entre instituciones públicas, incluso considerando las nuevas tecnologías.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adler, R. (2000). *Tropical Rainfall Distributions Determined Using TRMM Combined with Other Satellite and Rain Gauge Information*. Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. doi:doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<2007:TRDDUT>2.0.CO;2
- Alonso, C. (1995). *Sediment yield from watersheds with eroding channels*. American Society of Civil Engineers.
- ANA. (2012). *Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos*. Lima-Perú.
- ANA. (2015). *Inventario de Presas del Perú*. Lima, Perú.
- ANA. (s.f.). *Diagnóstico de Problemas y Conflictos en la Gestión de Cuencas*.
- Aparicio Mijares, F. J., & Mijares, F. A. (1989). *Fundamentos de la hidrología de superficie*. México.
- Arnold, J. (1996). *SWAT: Soil and Water Assessment Tool / User's Manual*. USDA-ARS.
- Arnoulds. (1977). *Predicting soil losses due to sheet and rill erosion*.
- Auerswald, K. (2014). *Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values*. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.008
- Beasley, D., Huggins, L., & Monke, E. (1989). *ANSWERS: a model for watershed planning*.
- Boyce, R. (1975). *Sediment Routing with Sediment Delivery Ratios*. USDA, Washington D.C.
- Branson, F., & Owen, J. (1970). *Plant Cover, Runoff, and Sediment Yield Relationships on Mancos Shale in Western Colorado*. doi:10.1029/WR006i003p00783
- Bureau of Reclamation. (1960). *Design of Small Dams*. United States Department of the Interior: Water Resources Technical Publication.
- Chaves. (1996). *Modelagem matemática da erosão hídrica: Passado, presente e futuro*.
- Chen, J. (2014). *Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Chow, V. T. (1988). *Applied Hydrology*. United States: Mc Graw-Hill Inc.

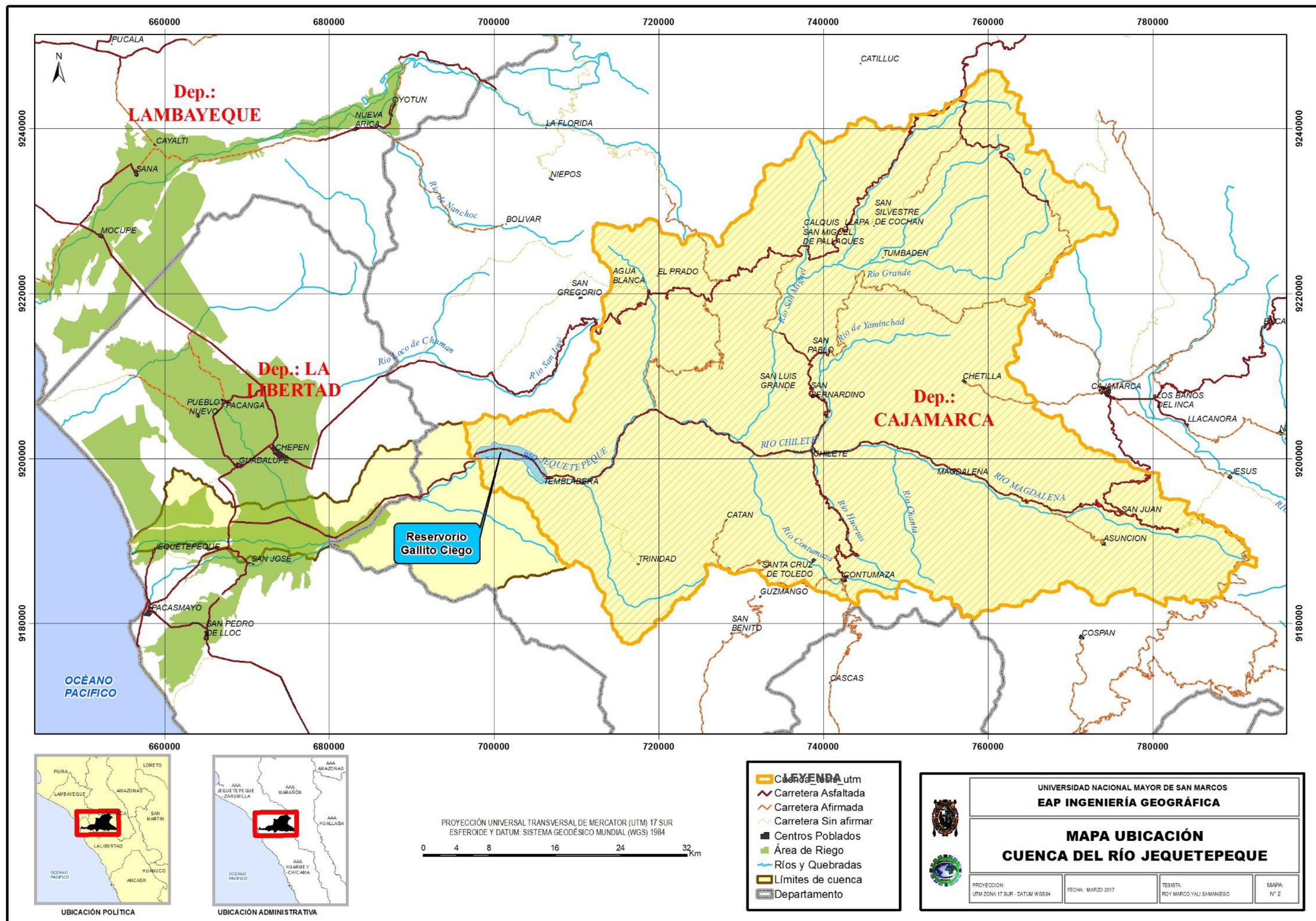
- Desmet, P., & Govers, G. (1996). *A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units*. Journal of Soil and Water Conservation.
- Doe, W. (1999). *The Soil Erosion Model Guide for the Military Land Managers: Analysis of Erosion Models for Natural and Cultural Resources Applications*,. Colorado, USA.
- FAO. (2002). *Tierra y población*. AQUASTAT.
- Foster, G. R. (1982). *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*. American Society of Agricultural Engineers.
- Funk, C. (2015). *The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes*. Scientific Data 2, Article number: 150066 . doi:doi:10.1038/sdata.2015.66
- Giboshi, M. (1999). *Desenvolvimento de um sistema especialista para determinar a capacidade de uso da terra*. Campinas - Brazil.
- Gottschalk, L. (1948). *Analysis and use of reservoir sedimentation data*.
- Harmon, R. (2001). *Landscape Erosion and Evolution Modelling*. New York, USA.
- Hengl, T. (2017). *SoilGrids250m: global gridded soil information based on Machine Learning*. PLOS ONE 12.
- Hicks, D., & Gomez, B. (2003). *Sediment transport Tools in Fluvial Geomorphology*.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press.
- Hsu, K.-I. (1997). *Free Access Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks*. Department of Hydrology and Water Resources, The University of Arizona, Tucson, Arizona. doi:doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<1176:PEFRSI>2.0.CO;2
- INADE. (2005). *Gestión de Oferta de agua en cuencas de Proyectos Hidráulicos del INADE-PERU*.
- INGEMMET. (1994). *Estudio Geodinámico de la Cuenca del Río Jequetepeque*. Lima - Perú.
- Jiang, & Zheng. (2008). *Water erosion process prediction model*. Science Press, Beijing (In Chinese).
- Jiménez, O., & Farías, H. (2005). *Problemática de la Sedimentación del Embalse Valdesia, República Dominicana*. Santo Domingo, República Dominicana.: nstituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la República Dominicana (INDRHI).
- Joyce, R. (2004). *CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution*. J. Hydromet., 5, 487-503.
- L., B., & G., F. (1987). *Storm erosivity using idealized intensity distributions*.
- Lavado, W. (2016). *PISCO: Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations. Precipitación v1.0*. Lima, Perú: SENAMHI.

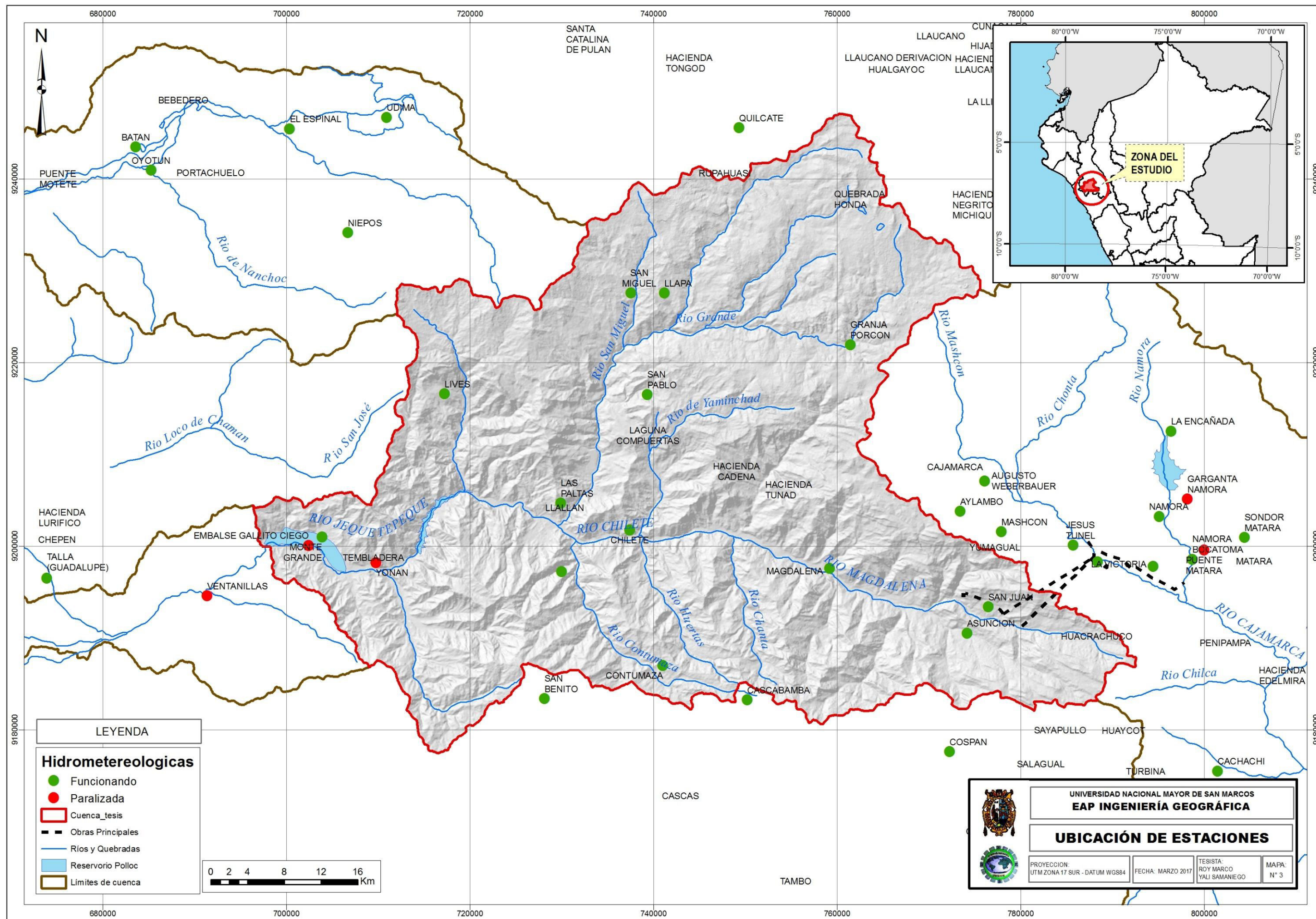
- Li, Y. (2015). *Spatial–Temporal Evolution of Soil Erosion in a Typical Mountainous Karst Basin in SWChina, Based on GIS and RUSLE*. King Fahd University of Petroleum & Minerals: Arabia Saudita. doi:10.1007/s13369-015-1742-6
- Lin, C. (2002). *Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience*. Soil Tillage.
- Liu, B., Xie, Y., & Zhang, K. (2001). *Soil Erosion Prognosis Model*. Science and Technology Press of China, Beijing.
- Mannaerts, C. (1999). *Factores de erosión*. Cochabamba, Bolivia.
- McCool. (1989). *Revised slope length factor for the universal soil loss equation*.
- Merrit, W. (2003). *A review of erosion and sediment transport models*.
- Merrit, W., Letcher, R., & Jakeman, A. (2003). *A review of erosion and sediment transport models*. Environmental Modelling & Software.
- Moore, & Burch. (1985). *Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation*.
- Moore, I., & Nieber, J. (1991). *Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution*. Minnesota Acad.
- Morera, S. (2014). *Magnitud, frecuencia y factores que controlan los flujos sedimentarios desde los andes centrales occidentales hacia el océano pacífico peruano*. Lima, Perú: UNALM.
- Nichols, M., & Renard, K. (1999). *Sediment yield from semi-arid watersheds*. Tucson, USA.
- Okamoto, K. I. (2005). *The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) project*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. doi:10.1109/IGARSS.2005.1526575
- Ortiz, O., Mejía, A., & Ingol, E. (2015). *SEDIMENT TRANSPORT IN THE JEQUETEPEQUE RIVER AND ITS IMPACT ON THE GALLITO CIEGO DAM, PERU*. Lima, Perú: 36th IAHR World Congress.
- Panago, P. (2015). *Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. doi:10.1016/j.landusepol.2015.05.021
- Perrin, C. (2001). *Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments*. Journal of Hydrology, 242.
- Pribyl, D. (2010). *A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor*.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., & Porter, J. (1991). *Revised Universal Soil Loss Equation*. J. of Soil and Water Conservation.
- Rocha, A. (2006). *La Problemática de la Sedimentación de Embalses en el Aprovechamiento de los ríos Peruanos, Aplicada al Embalse de Poechos*. . Lima, Perú.: I Congreso Internacional de Hidráulica, Hidrología, Saneamiento y Medio Ambiente. Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG). .

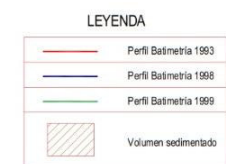
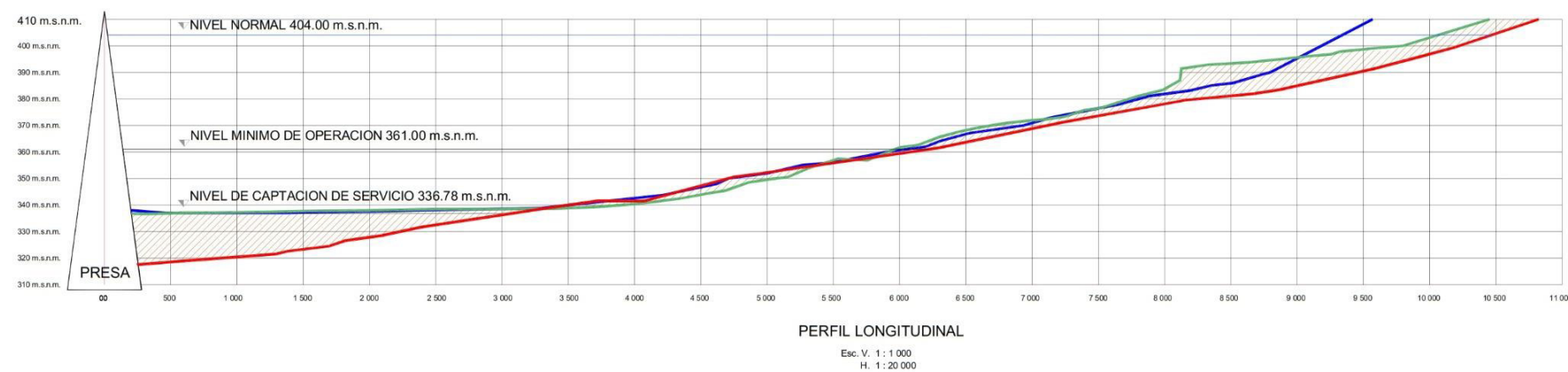
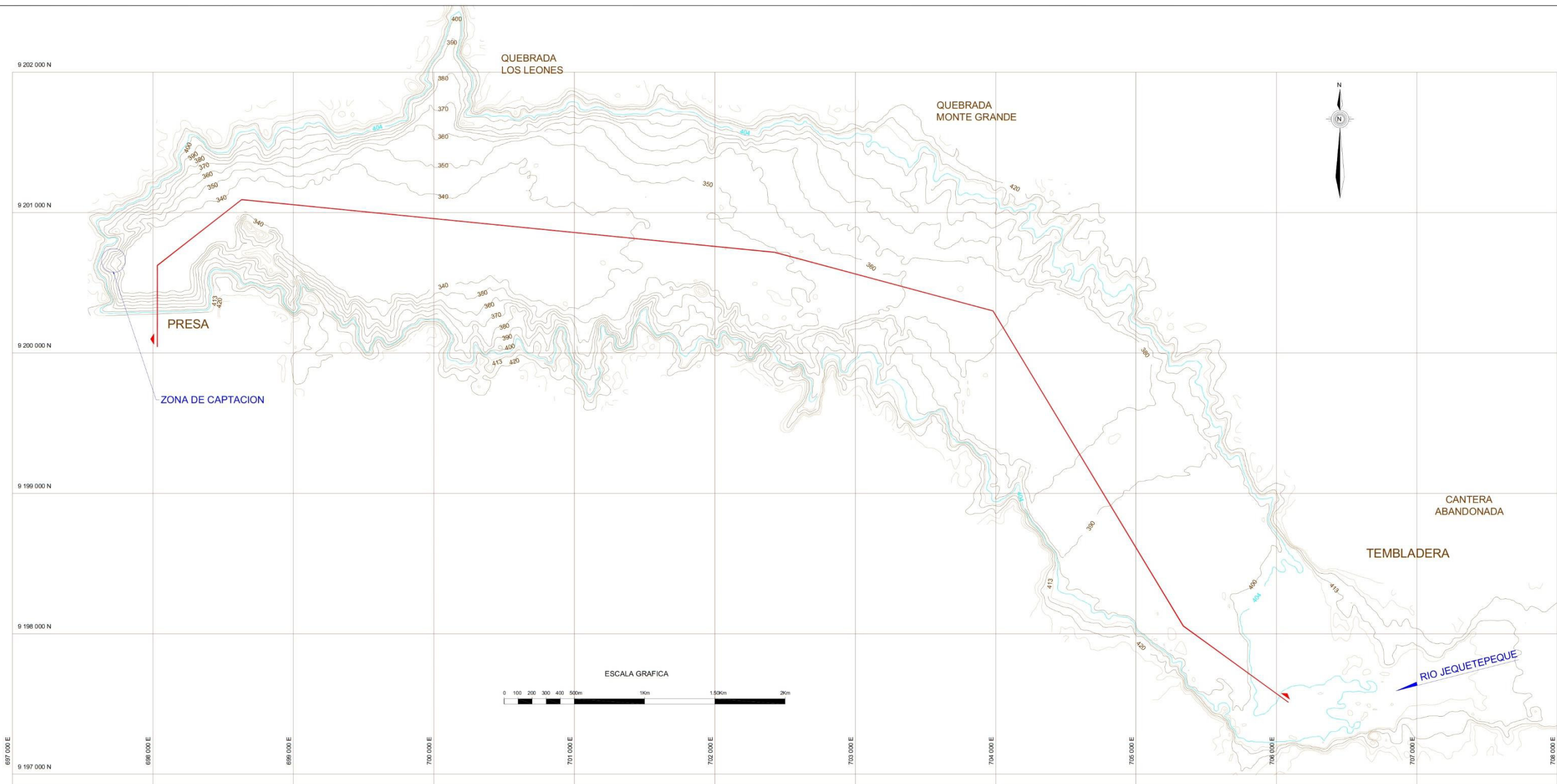
- Rustomji, P., & Prosser, I. (2001). *Spatial patterns of sediment delivery to valley floors: Sensitivity to Hydrological Processes*.
- Saavedra, C. (2005). *Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques*. The Netherlands.
- Sabino, E. (2016). *Análisis espacio-temporal de Erosión de suelos por Regiones Hidrológicas en el Perú (1981-2014)*. Lima - Perú.
- Sharpley, A., & Williams, J. (1990). *EPIC: Erosion/Productivity Impact Calculator:Model Documentation*.
- Slaymaker, O. (2003). *The sediment budget as conceptual framework and management tool*.
- Smith, E. (2007). *International Global Precipitation Measurement (GPM) Program and Mission: An Overview*. NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA.
- Symeonakis, E. (2001). *Soil Erosion Modelling over Sub-Saharan Africa Using Remote Sensing and Geographical Information Systems*. London, UK.
- Thornes, J. (1990). *Vegetation and erosion: processes and environments*. UK.
- USDA. (1972). *Sediment Source, Yields, and Delivery Ratios*. National Engineering Handbook, Section 3 Sediment.
- Vanoni, V. (1975). *Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54*. New York - USA.
- Vega, R. (2017). *Análisis de sensibilidad del tamaño de grilla sobre la calibración de modelos hidrológicos distribuidos en cuencas costeras*. Lima, Perú.: FIC-UNI.
- Wang, L., & Liu, H. (2006). *An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling*. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20.
- Weber, J. (2000). *Hidráulica del Transporte de Sedimentos*. Cap. en Hidrología y Procesos Hidráulicos. FCEFyN, UNC.
- Wickenkamp, V., Duttman, R., & Mosimann, T. (2000). *A multiscale approach to predicting soil erosion on cropland using empirical and physically based soil erosion models in a geographic information system*. Berlin-Germany.
- Williams. (1975). *Sediment Yield Prediction with Universal Equation using Runoff*.
- Williams, J., & Berndt, H. (1977). *Sediment Yield Prediction Based on Watershed*.
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses*. United States: Agriculture Handbook N°5.
- Zhu. (2014). *Soil erosion assessment using USLE in the GIS environment:a case study in the Danjiangkou Reservoir Region, China*. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3947-5>

11 ANEXOS









ANEXO C.03.01

EMBALSE GALLITO CIEGO, PLANTA Y PERFIL LONGITUDINAL

Diagrama de flujo de la metodología

